

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO DO ATERRO
SANITÁRIO OESTE DO DISTRITO FEDERAL PARA
APLICABILIDADE EM CAMADAS DE COBERTURA
UTILIZANDO A METODOLOGIA DE DANIEL E WU (1993)**

PAULO ANTONIO PEREIRA DE SOUSA

**ORIENTADOR: DSc. CLÁUDIA MARCIA COUTINHO
GURJÃO**
**CO-ORIENTADOR: DSc. CONCEIÇÃO DE MARIA
CARDOSO COSTA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL**

BRASÍLIA / DF: JULHO/2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO DO ATERRO
SANITÁRIO OESTE DO DISTRITO FEDERAL PARA
APLICABILIDADE EM CAMADAS DE COBERTURA
UTILIZANDO A METODOLOGIA DE DANIEL E WU (1993)**

PAULO ANTONIO PEREIRA DE SOUSA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**CONCEIÇÃO DE MARIA CARDOSO COSTA, DSc. (IFB)
(CO-ORIENTADOR)**

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**TOMÁS JOVIANO LEITE DA SILVA, Eng. Civil
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 de junho de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUSA, PAULO ANTONIO PEREIRA DE

Estudo das características do solo do Aterro Sanitário Oeste do Distrito Federal para aplicabilidade em camadas de cobertura utilizando a metodologia de Daniel e Wu (1993).

xi, 87 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2015)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Aterro Sanitário

2. Camada de Cobertura

3. Condutividade Hidráulica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUSA, P. A. P. (2016). Estudo das características do solo do Aterro Sanitário Oeste do Distrito Federal para aplicabilidade em camadas de cobertura utilizando a metodologia de Daniel e Wu (1993). Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Paulo Antonio Pereira de Sousa

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo das características do solo do Aterro Sanitário Oeste do Distrito Federal para aplicabilidade em camadas de cobertura utilizando a metodologia de Daniel e Wu (1993).

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Paulo Antonio Pereira de Sousa

QNP 30, Conjunto C, Casa 38.

72236-003 - Ceilândia/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida, e por me dar a oportunidade de alcançar mais esse objetivo.

À minha mãe, Francisca, por sempre ser para mim um modelo. Obrigado pelo apoio incondicional, incentivo nas horas difíceis e amor que tem me dado.

Ao meu pai Cícero, *in memoriam*, por apesar do pouco tempo que esteve presente me ensinar até hoje.

Às minhas irmãs, Maria Eduarda e Ana Carolina, por estarem sempre ao meu lado, pelo apreço e por serem parte do suporte que me trouxe até aqui. À minha namorada, Évellin, pelas palavras de apoio, pelos momentos compartilhados e por, acima de tudo, a cada dia me tornar uma pessoa melhor. A sua ajuda foi primordial.

Às minhas orientadoras, Cláudia Gurjão e Conceição Costa, pelo suporte neste período de pesquisa. Obrigado pela paciência, dedicação, correções e incentivos.

À Universidade de Brasília e ao Laboratório de Geotecnia, seu corpo docente e administração, pela oportunidade que me foi dada e por, especialmente, abrir meus olhos a novos horizontes e mostrar-me que o conhecimento transforma e edifica o homem.

Ao UniCEUB, na figura do professor Jairo e seus técnicos, por cederem suas instalações e materiais para a conclusão desta pesquisa e sobretudo à dedicação e auxílio de seus funcionários para o alcance deste objetivo.

Ao apoio dos pós-graduandos Rodrigo, Janneth e Tomás que, com extrema paciência auxiliaram-me e, juntamente comigo, desenvolveram ideias para concretização dessa etapa.

À minha comunidade paroquial, por estar comigo em todos os momentos, conhecer meus medos, fraquezas e participar das minhas alegrias.

Aos meus amigos Pedro Gabriel, Paulo Henrique e Vítor Camuzi que puseram as mãos no solo e há muitos anos estão comigo, compartilhado das fases boas e ruins de uma vida universitária. A ajuda de vocês foi essencial para a dinâmica desse trabalho.

Aos amigos que conquistei nestes anos de graduação e que tornaram o caminho até a colação uma experiência divertida e enriquecedora.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

RESUMO

Ao longo de toda a história da humanidade, a população sempre teve como um de seus principais hábitos a transformação da matéria e a consequente geração de produtos, demandando neste processo necessidades quanto à disposição adequada desses resíduos. O crescimento vertiginoso da população e a evolução do seu poder de compra tem afetado diretamente a geração de resíduos, sendo essa condição um dos maiores desafios modernos enfrentados pelas administrações públicas brasileiras. Alternativas eficientes de disposição de tais resíduos se fazem cada vez mais necessárias. Atualmente, o aterro sanitário é visto como uma das melhores alternativas, apresentando-se como uma solução viável para a disposição desses resíduos e permitindo, de forma eficaz, o confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. No entanto, para que funcione adequadamente, o aterro deve ter seus elementos estruturais bem dimensionados e executados, destacando-se a importância da camada de cobertura que além de minimizar a entrada de água na estrutura do aterro, diminui a emissão de gases nocivos para a atmosfera. Neste estudo, foi seguida a metodologia proposta por Daniel e Wu (1993), sendo modificado o número de pontos estudados da curva de compactação de cinco para três, de modo a verificar se o solo disponível no local do Aterro Sanitário Oeste do Distrito Federal atende às recomendações aplicáveis a materiais de cobertura de aterros. A primeira etapa do programa experimental contou com ensaios de caracterização, seguidos de ensaios de compactação, utilizando energias do *Proctor* Normal, Modificado e Reduzido. Posteriormente foi feita a avaliação das propriedades hidráulicas e mecânicas do solo, para pontos escolhidos nas curvas de compactação, incluindo ensaios de permeabilidade, resistência à compressão simples e retração volumétrica. Os resultados demonstram que, segundo os parâmetros de avaliação definidos nesta pesquisa, as curvas de compactação representantes das energias normal e reduzida seriam reprovadas para aplicabilidade em camadas de cobertura, visto que, nenhum dos pontos analisados para as curvas atenderam a todos os critérios simultaneamente. A curva de compactação com energia modificada mostrou-se apta em todos os critérios estabelecidos nos pontos analisados.

Palavras-chave: cobertura, aterro sanitário, propriedades, solo.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES	X
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	1
1.2. OBJETIVO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS.....	3
2.1.1. DEFINIÇÃO	3
2.1.2. PANORAMA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	5
2.2. ATERRO SANITÁRIO.....	9
2.3. SISTEMA DE REVESTIMENTO SUPERIOR IMPERMEÁVEL PARA ATERROS SANITÁRIOS	10
2.4. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA A CAMADA DE SOLO COMPACTADO.....	13
2.5. REQUISITOS DA CAMADA DE SOLO COMPACTADO PARA REVESTIMENTO SUPERIOR IMPERMEÁVEL - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	14
2.6. CENÁRIO DO ESTUDO - ATERRO SANITÁRIO OESTE.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1. MATERIAL SELECIONADO PARA A PESQUISA.....	24
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	25
3.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO SOLO.	26
3.3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	26
3.3.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	26
3.3.3. ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	28
3.3.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	29
3.3.5. ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA	30
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	33
4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	33
4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	33
4.1.2. LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE	35
4.1.3. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	35

4.2. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO SOLO	36
4.2.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	36
4.2.2. ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	37
4.2.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	39
4.2.4. ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA	44
4.3. APLICAÇÃO DO ESTUDO AO MÉTODO DE DANIEL E WU (1993).....	50
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	54
5.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÊNDICES	60
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - <i>PROCTOR</i> REDUZIDO	60
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - <i>PROCTOR</i> NORMAL.....	61
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - <i>PROCTOR</i> MODIFICADO	63
ENSAIO DE PERMEABILIDADE - <i>PROCTOR</i> REDUZIDO	64
ENSAIO DE PERMEABILIDADE - <i>PROCTOR</i> NORMAL	67
ENSAIO DE PERMEABILIDADE - <i>PROCTOR</i> MODIFICADO	70
ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES - <i>PROCTOR</i> REDUZIDO	73
ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES - <i>PROCTOR</i> NORMAL	76
ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES - <i>PROCTOR</i> MODIFICADO	79
ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA - <i>PROCTOR</i> REDUZIDO	82
ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA - <i>PROCTOR</i> NORMAL.....	84
ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA - <i>PROCTOR</i> MODIFICADO	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - População total do Brasil entre 1980 e 2010.	6
Figura 2.2 - PIB brasileiro entre 2008 e 2014.	6
Figura 2.3 - Geração total e per capita de resíduos sólidos no Brasil em 2013 e 2014.	7
Figura 2.4 - Coleta total e per capita de resíduos sólidos no Brasil em 2013 e 2014.	7
Figura 2.5 – Índice de abrangência da coleta de RSU sobre o total gerado.	8
Figura 2.6 - Destinação final RSU (a) no Brasil e (b) em Brasília, (t/dia).	8
Figura 2.7 - Corte da seção de um aterro sanitário.	9
Figura 2.8 - Esquema de construção do aterro sanitário.	10
Figura 2.9 - Esquema ilustrativo da cobertura ou revestimento impermeável superior.	11
Figura 2.10 - Resultados obtidos para ensaio de retração volumétrica com parcelas de areia de 88%, 50%, 25% e 0%.	19
Figura 2.11 - Procedimento para estabelecer a zona de teor de umidade e massa específica seca que atendam ao critério de condutividade hidráulica (k)	21
Figura 2.12 - Zona de aceitação.	22
Figura 3.1 - Fluxograma do programa experimental.	24
Figura 3.2 - Localização do ponto de coleta.	25
Figura 3.3 - Sequência de execução do ensaio de compactação.	28
Figura 3.4 - Montagem do ensaio de permeabilidade à carga variável.	29
Figura 3.5 - Sequência do processo de moldagem e execução do ensaio de RCS.	30
Figura 3.6 - Esquema do ensaio de retração volumétrica.	31
Figura 3.7 - Execução do ensaio de retração volumétrica.	32
Figura 4.1 - Curvas granulométricas do solo, com e sem ultrassom.	34
Figura 4.2 - Carta de plasticidade com indicação do ponto correspondente ao solo.	35
Figura 4.3 - Curvas de compactação, curva de saturação e pontos estabelecidos para o programa experimental.	36
Figura 4.4 - Variação dos coeficientes de permeabilidade (k_{20}) para as amostras.	38
Figura 4.5 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo compactado com energia reduzida.	40
Figura 4.6 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo compactado com energia normal.	40
Figura 4.7 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo compactado com energia modificada.	41
Figura 4.8 - Variação do módulo de elasticidade para as amostras.	42
Figura 4.9 - Resistência à compressão simples das amostras de solo ensaiadas.	43
Figura 4.10 - Energia de compactação x Resistência à compressão simples.	44
Figura 4.11 - Variação volumétrica para amostras compactadas com energia reduzida.	45
Figura 4.12 - Variação de massa para amostras compactadas com energia reduzida.	46
Figura 4.13 - Variação volumétrica para amostras compactadas com energia normal.	47
Figura 4.14 - Variação de massa para amostras compactadas com energia normal.	47
Figura 4.15 - Variação volumétrica para amostras compactadas com energia modificada.	48
Figura 4.16 - Variação de massa para amostras compactadas com energia modificada.	48
Figura 4.17 - Variação volumétrica das amostras de solo ensaiadas.	49
Figura 4.18 - Variação da massa em relação ao teor de moldagem.	50
Figura 4.19 - Padrão de variação dos critérios em função do teor de umidade de moldagem.	52
Figura 4.20 - Zona de aceitação para o solo estudado segundo a metodologia de Daniel e Wu (1993).	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Requisitos mínimos para o solo de impermeabilização.....	14
Tabela 2.2 - Etapas da construção do Aterro Sanitário Oeste no Distrito Federal.....	23
Tabela 3.1 - Parâmetros característicos às energias de compactação.....	27
Tabela 4.1 - Frações granulométricas do solo.....	34
Tabela 4.2 - Resultado dos ensaios de consistência para o solo..	35
Tabela 4.3 - Parâmetros dos nove pontos estabelecidos para o programa experimental.	37
Tabela 4.4 - Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade para o solo.	39
Tabela 4.5 - Teor de umidade de moldagem das amostras do ensaio de resistência à compressão simples.....	39
Tabela 4.6 - Teor de umidade de moldagem das amostras do ensaio de retração volumétrica.	44
Tabela 4.7 - Resumo dos resultados dos ensaios da 2ª etapa da pesquisa.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
ASO	Aterro Sanitário Oeste
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAESB	Companhia de Água e Esgoto de Brasília
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CCL	<i>Compacted Clay Liner</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH	Argila com alta Compressibilidade
CL	Argila com Baixa Compressibilidade
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONDER	Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia
DF	Distrito Federal
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
GC	Grau de Compactação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
k	Coeficiente de permeabilidade
k ₂₀	Coeficiente de permeabilidade à temperatura de 20° C

kPa	kilopascal
LL	Limite de Liquidez
NBR	Norma Brasileira
MH	Silte de Alta Compressibilidade
OECD	<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
OH	Solo Orgânico com Alta Compressibilidade
OMAFRA	<i>Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs</i>
PIB	Produto Interno Bruto
RCS	Resistência à Compressão Simples
RSU	Resíduo Sólido Urbano
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SC	Argila Arenosa
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
UnB	Universidade de Brasília
US	<i>United States</i>
US.EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WL	Limite de Liquidez
wot	Umidade ótima de compactação
W _P	Limite de Plasticidade
γ_d	Massa específica seca
γ_{dmax}	Massa específica aparente seca máxima

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A sociedade contemporânea tem a sua disposição, infindáveis estímulos e oportunidades de consumo provenientes dos avanços do sistema econômico vigente. Diante de um cenário de aumento populacional e concentração da população no âmbito urbano, tem-se uma maior demanda dos recursos naturais “cuja depleção ocorre tanto pela utilização para a produção e consumo, como pelos danos decorrentes do retorno dos resíduos à natureza, após sua utilização pelo homem” (GODECKE *et al.*, 2012, p.1700). Nesse sentido, tem-se o aumento da produção de resíduos sólidos e também da necessidade de seu gerenciamento, de modo a garantir a qualidade de vida dos indivíduos e também do meio ambiente.

Ampliadas as discussões acerca do meio ambiente, sabe-se da relevância de se compreender e buscar novas soluções acerca da preocupante produção de resíduos sólidos urbanos, uma vez que soma-se à questão ambiental outras problemáticas de igual importância, como doenças e emissão de gases do efeito estufa (GODECKE *et al.*, 2012).

Comparada a outras formas adequadas de tratamento e destinação de resíduos, os aterros sanitários além de demandarem tecnologias menos complexas para sua execução, constituem-se como uma das alternativas menos onerosas para lidar com o problema. Outro aspecto pertinente aos aterros sanitários é que seu desempenho está diretamente relacionado ao bom funcionamento dos sistemas de drenagem e impermeabilização.

A proteção do ambiente externo é garantida em grande parte pelos sistemas de impermeabilização do aterro sanitário. Segundo Costa (2015), os mesmos possuem atribuições diferentes. Nos sistemas de cobertura (*cover liners*) a função primordial é a restrição da infiltração de águas pluviais para o interior do aterro, já nos sistemas de impermeabilização da base (*bottom liners*), a incumbência é a diminuição do fluxo e atenuação dos efeitos químicos do chorume no lençol freático subjacente. Ambos os sistemas devem possuir características técnicas necessárias à adequação do mesmo às

suas funções, como baixa condutividade hidráulica, durabilidade, alta resistência mecânica.

Visto a importância do tema, este estudo trata a respeito da análise das características do solo do Aterro Sanitário Oeste, atualmente em processo de construção no Distrito Federal, para aplicação nos sistemas de revestimento impermeável da cobertura, segundo a metodologia proposta por Daniel e Wu (1993).

1.2. OBJETIVO

O presente estudo insere-se na linha de pesquisa de análise dos fatores que influenciam o comportamento de camadas de coberturas de aterros sanitários e tem por objetivo construir, a partir da metodologia definida por Daniel e Wu (1993), um intervalo nas curvas de compactação, para três níveis de energia diferentes, que definam uma zona aceitável para aplicação do solo do Aterro Sanitário Oeste para execução de camadas de cobertura de aterros sanitários, com ênfase no desempenho desses materiais quanto à permeabilidade, resistência à compressão simples e retração volumétrica.

Neste contexto, objetiva-se especificamente:

- Avaliar o comportamento hidráulico e mecânico do solo para diferentes teores de umidade e diferentes energias de compactação;
- Analisar comparativamente os resultados obtidos ao método de análise de solos proposto por Daniel e Wu (1993).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS

Diante de um contexto em que são amplas as discussões acerca do meio ambiente e da necessidade da tomada de consciência coletiva acerca do mesmo, advindas principalmente pelo viés do desenvolvimento sustentável, fazer uma análise sobre os resíduos sólidos não é só pertinente, mas também necessária. Essa questão está atrelada não só à temática ambiental, mas relaciona-se aos âmbitos social e econômico, uma vez que interfere de maneira incisiva na vida de muitos indivíduos.

2.1.1. DEFINIÇÃO

No Brasil, a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos que propõe instrumentos e objetivos para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, de maneira a trazer melhores práticas acerca desses resíduos e soluções para os problemas na gestão de resíduos sólidos que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros (Ministério do Meio Ambiente, 2015). Nesse sentido, salienta-se a importância da escolha de alternativas viáveis de disposição e tratamento para estes resíduos. Segundo a Lei, resíduos sólidos urbanos (RSU), são caracterizados pelos resíduos domiciliares, ou seja, refugos produzidos em atividades domésticas em residências urbanas, bem como resíduos de limpeza urbana.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), de 30 de novembro de 2004, os resíduos sólidos são:

“Resíduos nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

A acomodação dos resíduos gerados pela humanidade diretamente sobre o solo foi por muito tempo considerada uma prática aceitável, acreditando-se até então que o produto oriundo dos despejos, denominado de percolato, não afetava o meio ambiente ao seu

redor, sendo todo ele dissolvido pelo solo. A partir da década de 50, alguns países iniciaram o desenvolvimento de estudos no âmbito da contaminação provocada por este percolado investigando as possibilidades de contaminação das águas subterrâneas adjacentes aos depósitos de resíduos (Bernades Jr., Sabagg & Ferrari, 1999). A partir da confirmação de que os resíduos dispostos sem cuidados prévios podem contaminar o solo, o ar e as águas, superficiais e subterrâneas, fez-se necessária a destinação correta para este material, visando evitar assim a disposição dos resíduos em locais inapropriados que futuramente poderiam vir a comprometer a integridade dos recursos adjacentes à localidade. Nesse sentido, os resíduos são discriminados para determinar sua periculosidade.

A Norma Técnica Brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004) define como periculosidade de um resíduo a característica apresentada por este em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podendo apresentar:

- a) Risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade por incidência de doenças;
- b) Risco ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada.

Em se tratando de caracterização de resíduos sólidos quanto à periculosidade, a NBR 10004 (ABNT, 2004), divide-os nas seguintes classes:

- Classe I – Perigosos: são os resíduos que, por causa de suas propriedades físicas, químicas e infectocontagiosas, podem vir a expor saúde pública à ameaças, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento da mortalidade ou incidência de doenças e/ou riscos ao meio ambiente, quando manuseados ou destinados de forma inadequada, ou ainda apresentar características patogênicas, de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade.
- Classe II – Não perigosos:
 - Classe IIA – Não inertes: podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - Classe IIB- Inertes: quando amostrados em forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou

deionizada, à temperatura ambiente, não apontam nenhuma de suas substâncias constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

2.1.2. PANORAMA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O modo de vida humano, em especial urbano, gira em torno do consumo de recursos, sejam eles renováveis ou não renováveis, e consequente produção de resíduos. O crescimento da população é um agravante direto à geração destes resíduos e em consequência traz consigo a incumbência quanto à disposição correta do material descartado.

No ano de 2013, a média de geração per capita dos países estudados pela OECD, *Organization for Economic Co-operation and Development*, composta por 34 países membros com o intuito de favorecer o desenvolvimento de políticas econômicas e sociais, foi de 522 kg.habitante⁻¹.ano⁻¹, contrastada por extremos, como o da geração per capita de 297 kg.habitante⁻¹.ano⁻¹ na Polônia e de 751 kg.habitante⁻¹.ano⁻¹ na Dinamarca (OECD, 2014).

Bidone e Povinelli (1999) afirmam que a média de geração de resíduos sólidos per capita se altera em função de condições culturais, padrão de vida, hábito de consumo, e da renda familiar que define o poder de compra, assim, a produção per capita de resíduos sólidos é um indicador socioeconômico. No Brasil, o último exame da OECD, em relação à geração per capita de resíduos sólidos, é do ano de 2012 com um índice de 295 kg.habitante⁻¹.ano⁻¹. O volume total de resíduos sólidos produzidos é reflexo direto de dois fatores constatados nos últimos anos: o crescimento do número de habitantes e o aumento do produto interno bruto per capita (Campos, 2009). As Figura 2.1 e Figura 2.2 explicitam os fatores anteriormente citados observados nos últimos anos.

Os gastos decorrentes da produção e descarte de materiais, entre despesas com limpeza urbana e disposição final, também são um dos grandes problemas atuais enfrentados em diversas regiões do mundo. Segundo o World Bank (1999), as despesas com a disposição final de resíduos sólidos no Japão, um dos países mais ricos do mundo e com geração per

capita de 354 kg.habitante⁻¹.ano⁻¹ em 2010, é 10 vezes maior que o valor gasto na coleta, em virtude do limite de espaço físico, enquanto os países em desenvolvimento desembolsam até 80% de seu orçamento com limpeza urbana na coleta dos resíduos.

Figura 2.1 - População total do Brasil entre 1980 e 2010. Fonte: IBGE (2015).

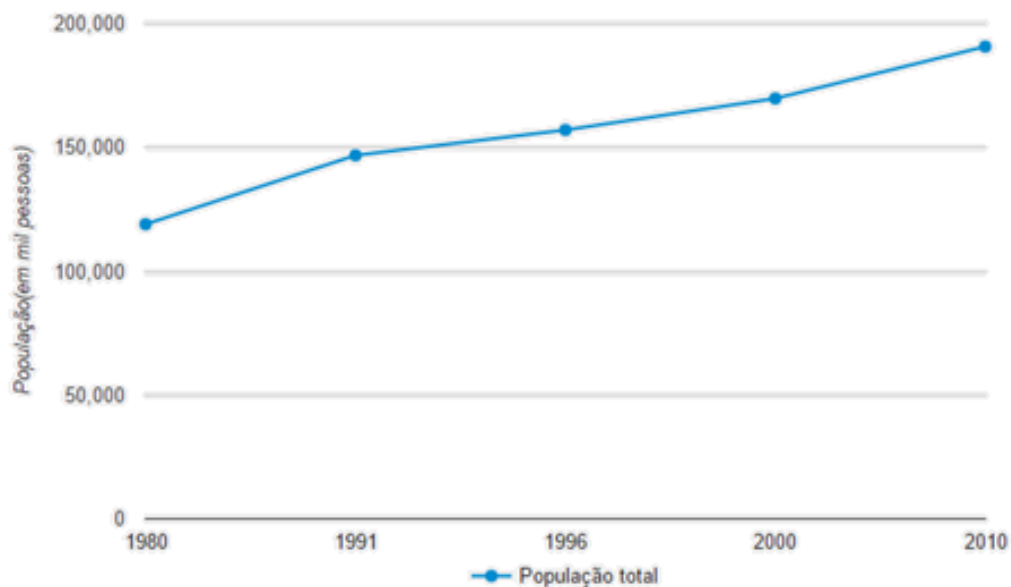
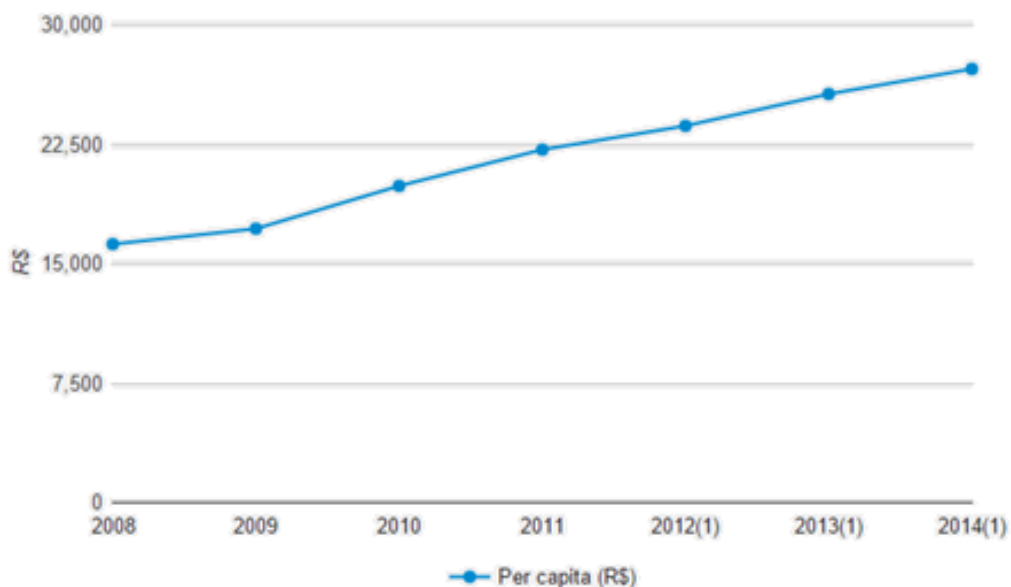


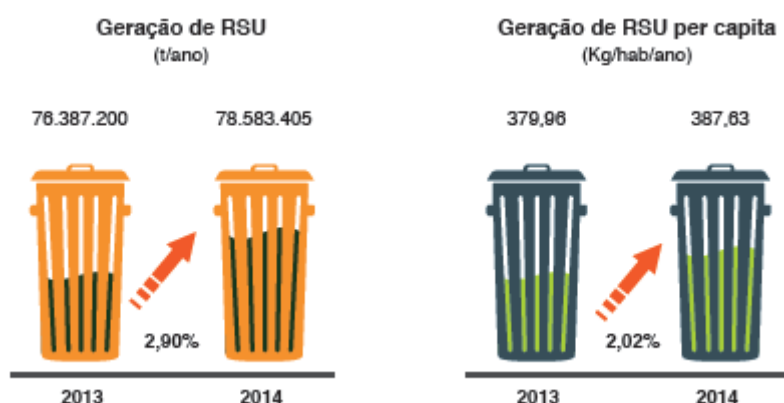
Figura 2.2 - PIB brasileiro entre 2008 e 2014. Fonte: IBGE (2015).



Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, no Brasil, no ano de 2014, a geração total de Resíduos Sólidos Urbanos -

RSU foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas, representando um aumento de 2,9%, cerca de 2 milhões de toneladas, comparado ao ano anterior, crescimento este que supera o índice de crescimento da população no mesmo período, sendo este valor de 0,9%. Tal crescimento é explicado pelo aumento do índice representativo da geração de RSU per capita que no intervalo de tempo subiu cerca de 2% (ABRELPE, 2014). Os índices estão representados na Figura 2.3 a seguir:

Figura 2.3 - Geração total e per capita de resíduos sólidos no Brasil em 2013 e 2014. Fonte: ABRELPE (2014).



Pode-se notar na Figura 2.4 o crescimento também dos índices de coleta, total e per capita, nos anos de 2013 a 2014, representando um índice de cobertura de aproximadamente 90,6% do total gerado em todo o território nacional. O nível de abrangência da coleta de resíduos sólidos urbanos por região do Brasil pode ser observado na Figura 2.5, mostrando que a eficiência do sistema de coleta não é uniforme ao longo de todas as regiões do Brasil.

Figura 2.4 - Coleta total e per capita de resíduos sólidos no Brasil em 2013 e 2014. Fonte: ABRELPE (2014).

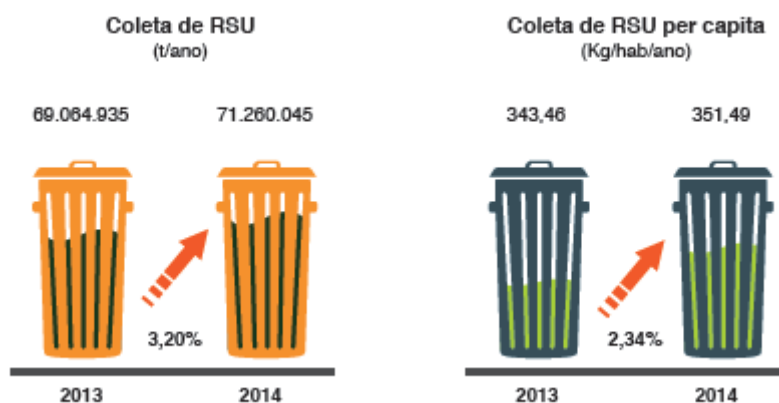
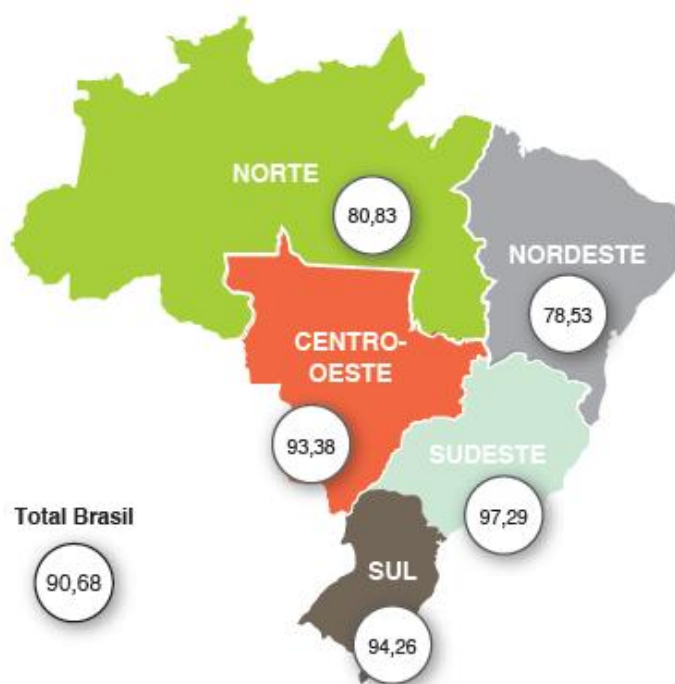
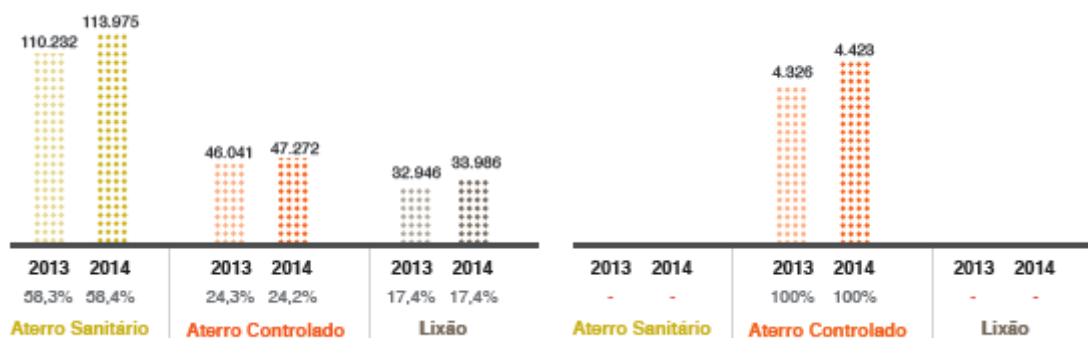


Figura 2.5 – Índice de abrangência da coleta de RSU sobre o total gerado. Fonte: ABRELPE (2014).



Ao se referir a destinação final, dados da ABRELPE (2014) demonstram que, em nível nacional, houve uma evolução no intervalo de 2013 a 2014 no percentual de final de resíduos sólidos urbanos que possuem como destinação final um aterro sanitário. O Distrito Federal, porém, não acompanha os dados do país, não possuindo até o momento da pesquisa, um aterro sanitário. Sendo assim, o destino final de todo o lixo é inevitavelmente o aterro controlado da cidade Estrutural. A Figura 2.6 demonstra os parâmetros citados.

Figura 2.6 - Destinação final RSU (a) no Brasil e (b) em Brasília, (t/dia). Fonte: ABRELPE (2014).



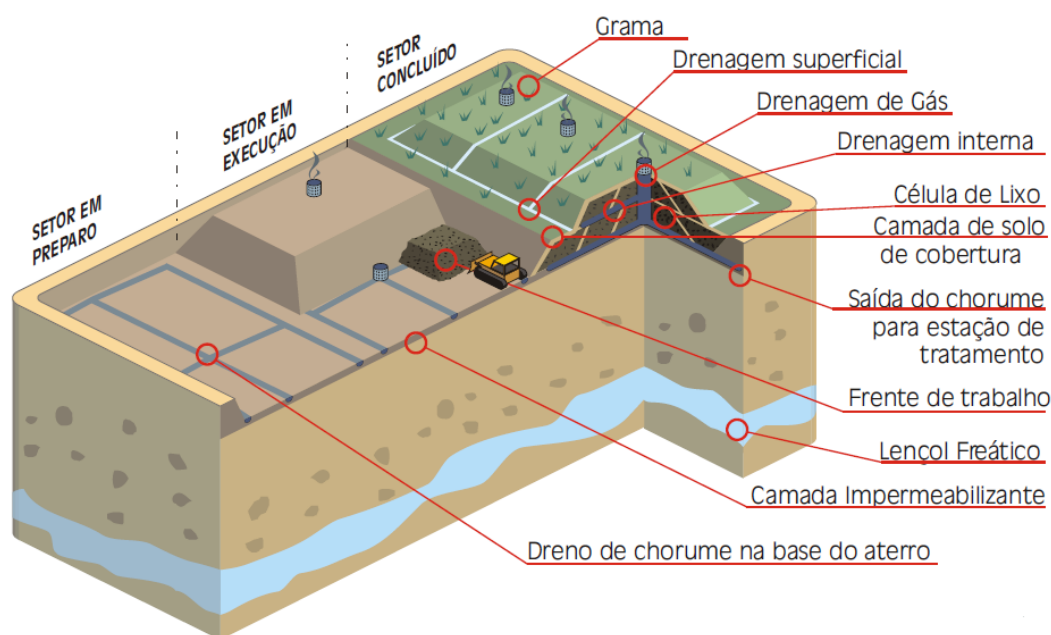
(a)

(b)

2.2. ATERRO SANITÁRIO

Segundo a CONDER, Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia, o aterro sanitário é um mecanismo projetado para receber e tratar o lixo gerado pelos habitantes de uma cidade, com base em estudos de engenharia, para reduzir ao máximo os impactos causados ao meio ambiente pelos dejetos em questão (CONDER, 2005). A Figura 2.7 representa a estrutura de um aterro sanitário.

Figura 2.7 - Corte da seção de um aterro sanitário. Fonte: Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (2005).

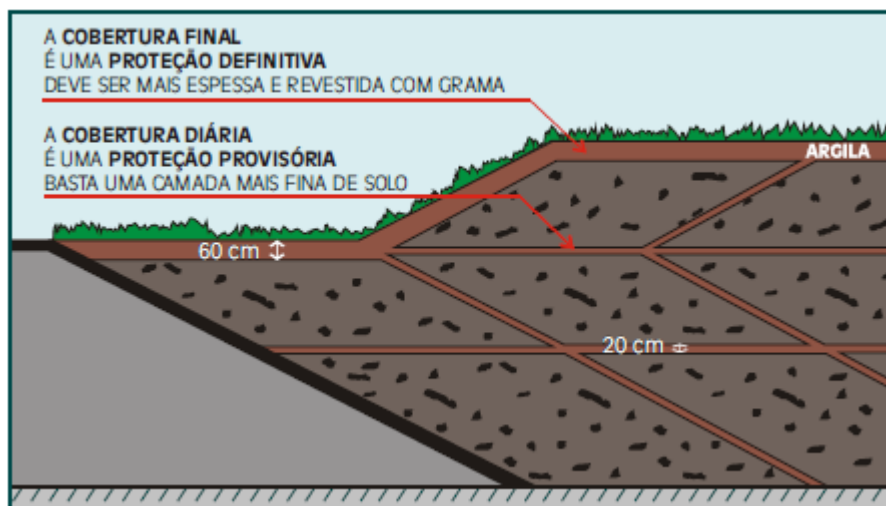


De acordo com Boscov (2008), a finalidade principal de um aterro sanitário é, a partir da restrição da movimentação de resíduos, conter a migração de contaminantes para o meio, evitando-se assim riscos de contaminação do ar, de águas subterrâneas ou águas superficiais, bem como reações excêntricas na cadeia alimentar. Dessa maneira, o projeto de tal estrutura visa bloquear o contato entre o material descartado e o meio ambiente, preservando assim o espaço vizinho de possíveis projeções de produtos e subprodutos oriundos dos resíduos encontrados no aterro sanitário.

O aterro sanitário é construído em células, ou seja, uma parcela do terreno é preparada sendo preenchida, posteriormente, por resíduos até uma cota pré-determinada, encerrando-se assim a célula com uma camada de solo intermediária e partindo-se para outra célula adjacente (Figura 2.8). Quando o aterro alcança a sua cota de conclusão, é

construída sobre a camada final de resíduos uma cobertura ou revestimento superior impermeável que além de isolar a massa de resíduos do meio externo, minimiza a entrada de água no aterro, diminuindo diretamente o volume de percolado.

Figura 2.8 - Esquema de construção do aterro sanitário. Fonte: Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (2005).



A disposição adequada de resíduos em aterros sanitários objetiva impedir a contaminação do solo e da atmosfera com lixo ou produtos de sua decomposição, minimizando assim impactos ambientais e prejuízos à saúde que seriam causados por uma disposição inadequada do material contaminante. Desta forma, a impermeabilização da massa de resíduos é uma exigência fundamental para a sua contenção e, como consequência, evitar, tanto quanto possível, a contaminação do meio ambiente por transporte advectivo ou difusivo dos contaminantes. Faz-se necessário então que o fundo, os taludes laterais e a camada de cobertura do aterro sejam revestidos com material de baixa permeabilidade (Mendes *et al.*, 2011).

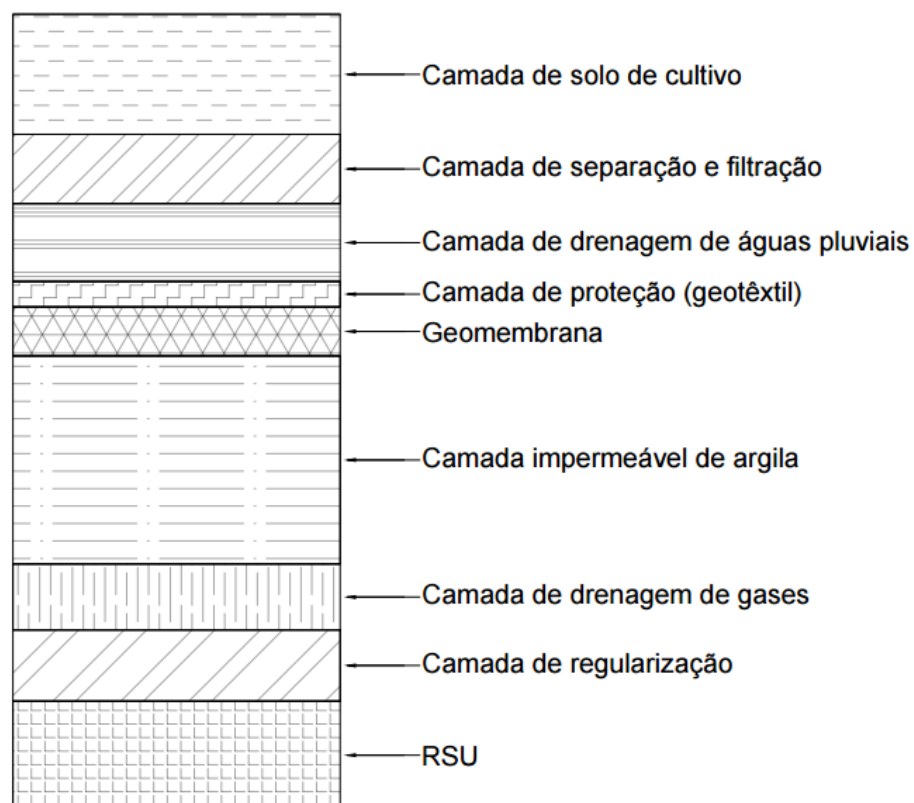
2.3. SISTEMA DE REVESTIMENTO SUPERIOR IMPERMEÁVEL PARA ATERROS SANITÁRIOS

Referindo-se ao revestimento impermeável superior do aterro sanitário, Boscov (2008) afirma que este possui como principais finalidades: enclausurar os resíduos compactados do meio ambiente, preservar o meio ambiente de gases advindos das reações de decomposição do material interno ao aterro, bem como também evitar a entrada de gases,

e minimizar a entrada de água na massa do aterro, diminuindo diretamente o volume de percolato gerado no interior da célula.

O revestimento superior de um aterro sanitário é, na maioria dos casos, composto no sentido ascendente pelas seguintes camadas: regularização, drenagem dos gases, impermeabilizante de argila, geomembrana, proteção (normalmente representada por um geotêxtil), camada drenante para águas pluviais, camada de separação e filtração e, por fim, uma camada de solo destinada ao cultivo (Boscov, 2008). A Figura 2.9 faz alusão as camadas anteriormente citadas. A seguir são citados fatores característicos de cada camada.

Figura 2.9 - Esquema ilustrativo da cobertura ou revestimento impermeável superior. Fonte: Boscov (2008) - modificado.



- a) Camada de regularização: elemento localizado na parte mais inferior do sistema de revestimento. Além de minimizar os efeitos de recalques diferenciais, tem a função de proporcionar um subleito firme para posteriores compactações de camadas sobrepostas aos resíduos.

- b) Camada de drenagem de gases: camada responsável pela condução dos gases gerados pela decomposição dos resíduos para os drenos de gás.
- c) Camada impermeável de argila: tem como função tornar o sistema de cobertura superior impermeável, minimizando a percolação de todo o conjunto. Nesta camada geralmente são utilizados solos argilosos compactados ou, na falta dos mesmos, pode-se utilizar misturas de solos com bentonita.
- d) Geomembrana: se caracteriza como um material flexível, contínuo e impermeável, com espessura variante entre 0,5 a 2,5 mm e o coeficiente de permeabilidade entre 10^{-12} e 10^{-15} m/s.
- e) Camada de proteção (geotêxtil): produto têxtil fino, permeável, flexível e bidimensional. As propriedades intrínsecas ao geotêxtil dependem diretamente do polímero usado e da sua estrutura.
- f) Camada drenante de águas pluviais: possui como incumbência a remoção da água que adentra, a partir das camadas superiores, o revestimento de cobertura, minimizando a percolação e conduzindo a água para o exterior do aterro.
- g) Camada de separação e infiltração: possui a função de proteger as camadas inferiores dos processos erosivos, principalmente da condição de ciclos de molhagem e secagem. Esta camada também pode armazenar temporariamente a água infiltrada de modo que esta retorne ao ambiente externo por evapotranspiração.
- h) Camada de solo de cultivo: tem como função proteger o revestimento superior do aterro sanitário de erosões causadas pelo vento e pela água. Geralmente é coberta por vegetação.

O aspecto impermeabilizante da cobertura é garantido, em sua maioria, pelo trabalho conjunto das camadas de argila impermeável e da geomembrana.

Além das preocupações normais quanto à capacidade impermeabilizante, outros fatores também se fazem essenciais à eficácia da camada de revestimento superior. A cobertura em si é demandada diariamente por uma série de solicitações que, se ultrapassarem a capacidade resistente do sistema, podem levar à formação de fissuras e trincamentos,

criando assim caminhos preferenciais de fluxo e prejudicando a estanqueidade do conjunto. Boscov (2008) estabelece alguns tipos de solicitações comumente encontradas em camadas de cobertura de aterros sanitários, como: penetração de raízes, ciclos de molhagem e secagem, trânsito de veículos, oscilações de temperatura, recalques diferenciais e totais, gerados pelo processo de compressão do solo de fundação e dos resíduos, e erosão por vento e água.

Por conta da baixa permeabilidade da geomembrana e ao fato dela ser um produto industrializado, muitas vezes há um descaso no tratamento e qualidade de execução de outros instrumentos complementares às membranas, como a camada de CCL. Recalques diferenciais e mudanças nas propriedades geotécnicas em decorrência da incompatibilidade do percolado com o solo, podem por vezes chegar a causar danos à geomembrana, prejudicando toda a funcionalidade do sistema. Por consequência, o cuidado na execução da camada de solo compactado (CCL) é de vital importância para toda a eficácia da camada de revestimento impermeável superior do aterro sanitário (Boscov, 2008).

2.4. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA A CAMADA DE SOLO COMPACTADO

De acordo com Assis (2003), os materiais de construção disponíveis, suas características geotécnicas quando compactados e as características logísticas e econômicas das áreas de empréstimo, constituem um dos fatores mais importantes na concepção de obras de terra. Sendo assim, tais obras, por exigirem grandes movimentações de terra, geralmente usam material do próprio local ou de áreas de empréstimo próximas, visto que, a movimentação de uma grande massa de solo acarreta em consumo de tempo e recursos. Muitas vezes, são necessários estudos e investimentos nos solos presentes no local de implantação do aterro, para que, com os usos de aditivos e de diferentes energias de compactação, entre outros, o solo possa atender de maneira satisfatória às funções às quais é solicitado.

De acordo com Boscov (2008),

“Os requisitos da camada de solo compactado são baixa permeabilidade, compatibilidade química a longo prazo com os poluentes, alta capacidade de retenção de poluentes, baixo coeficiente de difusão, alta capacidade de suporte e baixa compressibilidade” (p. 140).

A NBR 13896 (ABNT, 1997) trata dos critérios para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos. Todavia, a mesma não estabelece critérios de seleção de materiais para a camada de solo de cobertura do aterro. Enfatiza que condições como os limites de consistência e a distribuição granulométrica visam unicamente assegurar um coeficiente de permeabilidade igual ou menor a 10^{-9} m/s, entretanto, o requisito de baixa permeabilidade também pode ser atingido por solos que não atendam aos requisitos mínimos apresentados na Tabela 2.1, desde que sejam usadas atitudes corretivas. Além do que, em regiões tropicais, parâmetros como a granulometria e os índices de consistência não são bons indicadores em todos os casos de seleção de solos para compactação, quando se deseja obter baixa permeabilidade (Bosco, 2008).

Tabela 2.1 - Requisitos mínimos para o solo de impermeabilização. Fonte: Ferrari, 2005 (*apud* Bosco, 2008).

Fonte	LL (%)	IP (%)	Finos $\phi \leq 0,075$ mm (%)	Fração Argila $\phi \leq 0,002$ mm (%)	Fração Areia $0,075 \text{ mm} < \phi \leq$ 4,8 mm (%)	Fração Pedregulho $\phi > 4,8$ mm (%)	k (m/s)
Omafra (2003)	$30 \leq LL \leq 60$	$11 \leq IP \leq 30$	≥ 50	≥ 20	≤ 45	≤ 50	$\leq 10^{-9}$
EPA (1989)	-	≥ 10	≥ 20	-	-	≤ 10	$\leq 10^{-9}$
CETESB (1993)	≥ 30	≥ 15	≥ 30	-	-	-	$\leq 10^{-9}$

A US.EPA (2004) assume que solos argilosos são os mais indicados para a construção de camadas de cobertura de aterros. A agência define como limite máximo o valor da condutividade de 10^{-9} m/s para aterros de resíduos classificados como perigosos e 10^{-7} m/s para aterros de resíduos sólidos urbanos.

Tendo como base o Sistema Unificado de Classificação dos Solos, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, (1993) (*apud* Costa, 2015) indica como solos mais adequados para composição na construção de camadas impermeabilizantes os tipos, CL, CH, SC ou OH (CETESB, 1993 *apud* Costa, 2015).

2.5. REQUISITOS DA CAMADA DE SOLO COMPACTADO PARA REVESTIMENTO SUPERIOR IMPERMEÁVEL - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Além da preocupação com a condutividade hidráulica, o projeto e construção de revestimentos de solos e coberturas bem-sucedidos envolvem muitos aspectos, por

exemplo, seleção de materiais, avaliação de compatibilidade química, determinação da metodologia de construção, análise de estabilidade de taludes e capacidade de carga, avaliação de subsidência, consideração de fatores ambientais, como a dessecação, e desenvolvimento e execução de um plano de garantia de qualidade de construção (Daniel, 1987).

Em se tratando do estudo desses outros aspectos importantes no projeto e construção de coberturas de aterros sanitários, Daniel e Benson (1990) estudaram teores de umidade em solos para revestimento de solo compactado de forma diferente da abordagem usual adotada em muitos projetos do tipo. A abordagem recomendada por eles baseia-se na definição de requisitos de teores de água para uma ampla, mas representativa, faixa de energia de compactação, e relacionar esses requisitos a condutividade hidráulica e outros fatores relevantes.

Solos ricos em argila são comumente utilizados na construção de revestimentos de baixa condutividade hidráulica, sendo tipicamente compactados na umidade ótima (Mitchell *et al*, 1965). Esta prática minimiza a condutividade hidráulica do solo compactado. No entanto, em locais com clima relativamente seco ou locais onde a argila pode ser submetida à secagem sazonal, esta prática poderia ser contraprodutiva se o revestimento acabar ressecando, visto que, as fissuras provenientes da secagem da camada de cobertura são essencialmente caminhos preferenciais de fluxos, prejudicando a eficiência do mecanismo.

Um estudo que ilustra como o conteúdo de água de moldagem e a massa específica seca pode influenciar a condutividade hidráulica da argila compactada foi produzido por Mitchell e outros (1965), apontando que a energia e o método de compactação influenciam significativamente a condutividade hidráulica da camada do solo compactado em questão. Para um dado método de compactação, o aumento da energia de compactação reduz a condutividade hidráulica do solo.

Resistência ao cisalhamento e condutividade hidráulica não são os únicos parâmetros importantes para o engenheiro que projeta camada de revestimento e coberturas do solo, potencial para dessecação, resistência ao ataque químico, o atrito interfacial com geomembrana sobrepostas, e capacidade de se deformar sem a formação de fissuras, são

apenas alguns dos parâmetros adicionais que muitas vezes exigem consideração (Daniel e Benson, 1990). Claramente, a melhor maneira de se estabelecer uma zona aceitável apropriada é basear-se em parâmetros de interesse e, em seguida, relacionar os parâmetros para o teor de umidade de moldagem e a massa específica aparente seca máxima, parâmetros esses definidos posteriormente como baixa condutividade hidráulica, retração volumétrica não excessiva e resistência à compressão compatível. A condutividade hidráulica é o parâmetro chave para a maioria das coberturas de solo e, grande atenção é geralmente focada em garantir que a baixa condutividade hidráulica seja alcançada. O objetivo do processo seria então, a partir da definição de um intervalo aceitável de conteúdo de água de moldagem e massa específica seca ajustar, com base em outros fatores de interesse ao projeto, o mesmo intervalo de teor de água de moldagem e massa específica seca para que, se obtenha como produto final um trecho, variante para cada energia de compactação, ainda mais eficiente e aplicável ao projeto.

O projeto racional de camadas de revestimento impermeável de solo compactado deve ser baseado em dados de ensaios desenvolvidos para cada solo particular. Segundo Daniel e Benson (1990), dados de campo seriam mais aplicáveis para análise do que dados experimentados em laboratório, mas o custo da determinação dos critérios de compactação em campo através de uma série de seções de teste seria quase sempre proibitivo. Para o engenheiro projetista, testes de laboratório usando o método mais apropriado para a compactação (para coincidir com compactação no campo, tanto quanto possível) são recomendados. Contudo, a compactação em escala de laboratório nunca pode perfeitamente duplicar a real compactação feita em campo a partir de repetidas passagem do equipamento de compactação sobre o solo. A abordagem lógica é de selecionar várias energias de compactação no laboratório que abrangem a gama de esforço de compactação futuramente usados em campo de modo que o teor de água no solo e a massa específica seca se apliquem a qualquer esforço de compactação razoável.

Em um comparativo entre o desempenho da compactação em laboratório e sua referente representação em campo para a maioria dos projetos de terraplenagem, o *Proctor Modificado* (ASTM, 2000b) representa um limite superior razoável sobre o esforço de compactação propenso a ser exercido ao solo em campo. Já o esforço exercido pelo *Proctor Padrão* (ASTM, 2000a) representa mais proximamente um esforço de compactação médio. É concebível que em muitos projetos, pelo menos em alguns locais

na extensão de solo, irão ser compactados com um esforço menor do que o esforço médio de compactação, muitas vezes por dificuldades de acesso ao solo com o equipamento de compactação ou por falta de controle da equipe responsável pela compactação em campo. Assim, faz-se necessário a representação, em laboratório, de um método de compactação que represente um esforço de compactação abaixo da média. Uma versão alterada do *Proctor* Padrão, intitulado de *Proctor* Reduzido satisfaz essa necessidade. Nele o procedimento do *Proctor* Padrão são seguidos, exceto que somente 15 golpes do soquete são utilizados, em vez dos habituais 25 golpes. O procedimento do *Proctor* Reduzido é o mesmo empregado no ensaio de compactação de 15 golpes descrito pela *US Army Corps of Engineers*. O esforço do *Proctor* Reduzido é simulado para corresponder a um nível mínimo razoável de energia de compactação para um típico forro ou cobertura do solo. Outros métodos de compactação também podem ser utilizados seguindo o princípio de abranger a gama de esforços de compactação esperados no campo com os procedimentos de compactação em laboratório.

O princípio do problema é o fato de que a medida que teor de água de moldagem de um solo compactado é aumentado, o potencial de encolhimento ou retração volumétrica do solo aumenta também. Projetos de engenharia geotécnica com exigências de baixa permeabilidade de solos, como, por exemplo, camadas de cobertura de solo de aterro sanitários, exigem, na maioria dos casos, que a condutividade hidráulica do solo compactado não ultrapasse o limite máximo especificado de 1×10^{-9} m/s para a maioria das categorias de resíduos. No entanto, enquanto a compactação na umidade ótima é estabelecida como a melhor prática para alcance da eficiência em termos de baixa permeabilidade, questiona-se se a técnica de construção de barreiras de revestimento compactadas na umidade ótima é a solução mais eficiente em climas secos e áridos onde o material pode, desde que exposto em meio ambiente a secagem, formar fissuras no processo. Faz-se necessário adequação dos parâmetros para um desempenho conjunto a fim de alcançar como produto final um solo que atenda, ao mesmo tempo, os requisitos necessários de baixa condutividade hidráulica e o potencial mínimo de retração, e consequente fissuração, quando sujeito à secagem.

Em se tratando ainda das fissuras originárias de processos de ressecamento em camadas de cobertura, Rayhani *et al.* (2007) ensaiaram três solos argilosos naturais do Irã utilizados para a construção de barreiras de argila e um solo argiloso artificial. Os

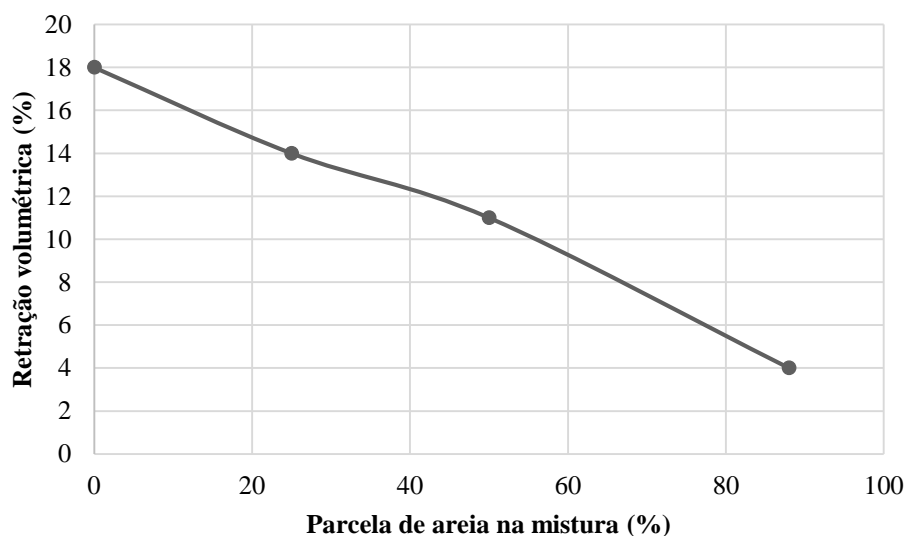
materiais foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem sendo que no processo foram formadas fissuras superficiais de diferentes dimensões. Foi observado que as amostras com as maiores retrações volumétricas, tipicamente, continham o maior número de fissuras. Os resultados dos testes de condutividade mostraram que o crescimento do índice de plasticidade e do teor de argila eram acompanhados pelo aumento na dimensão das fissuras, aumentando assim a condutividade hidráulica. Depois de submetidos a ensaios de permeabilidade, observou-se que, nas amostras fissuradas, a condutividade era aumentada na ordem de 12 a 34 vezes do valor obtido na amostra íntegra.

Segundo Miller & Rifai (2004), diversos estudos avaliaram o uso de aditivos no solo, como cal, cimento e areia, objetivando a redução da fissuração. Os resultados iniciais indicaram que o encolhimento do solo foi reduzido, no entanto, em muitos casos, o uso de aditivos resultou em um aumento da condutividade hidráulica e diminuição da plasticidade do solo. Eles investigaram o impacto do reforço de fibra sobre o desenvolvimento de rachaduras de dessecação em amostras de argila compactada, bem como o impacto dos aditivos de fibra na trabalhabilidade do solo, característica de compactação e condutividade hidráulica. Os resultados deste estudo indicam que, para os solos da investigação, o teor de fibra ótima necessária para alcançar a redução máxima de fissuras e massa específica seca máxima, mantendo-se a condutividade hidráulica aceitável, foi de 0,4 e 0,5% da massa de solo. A redução observada nas rachaduras para esta gama de teor de fibra era de aproximadamente 50%, em comparação com a amostra de solo não alterada, sendo a redução máxima observada de cerca de 90%, para um teor de fibras de 0,8%. Embora a redução da fenda poderia ser ainda aumentada através do aumento do teor de fibras, a condutividade hidráulica da amostra aumentou significativamente.

Um estudo realizado por Albright *et al.* (2006) no sul da Geórgia, EUA, foi produzido para avaliar a mudança nas propriedades hidráulicas de camadas de barreira de argila compactada em uma cobertura final do aterro ao longo de quatro anos. Os ensaios *in situ* e laboratoriais indicaram que o aumento percebido na condutividade hidráulica era de aproximadamente três ordens de magnitude, de 10^{-9} para 10^{-6} m/s, durante a vida útil. A grande explicação para o fenômeno foi a formação de grandes rachaduras ao longo do tempo de operação do aterro sanitário. Os resultados também indicam que as barreiras de argila devem ser protegidas de ressecamento e de raízes.

Vários estudos a respeito da compatibilização entre baixos coeficientes hidráulicos e fissuração induzida por ressecamento em solos compactados foram produzidos. Kleppe & Olson (1985) investigaram o ressecamento de duas argilas altamente plásticas e misturas de areia/bentonita. Os autores compactaram corpos de prova cilíndricos e descobriram que a retração volumétrica produzida por ressecamento foi linearmente proporcional ao teor de água de moldagem, mas a mesma foi insensível quanto à massa específica seca. Para estudar a fissuração, os autores compactaram placas de argila confinando as bordas das placas durante a secagem ao ar. As fissuras maiores, denominadas de principais, foram definidas como o desenvolvimento de trincas superiores a 10 mm de largura e ocorreram quando retrações volumétricas em amostras cilíndricas, compactadas com o mesmo teor de água de moldagem e massa específica seca, foram superiores a 4%. Kleppe & Olson também descobriram que as retrações volumétricas eram muito menores nas areias argilosas do que em solos com pouca areia. A Figura 2.10 mostra os resultados obtidos pelos autores.

Figura 2.10 - Resultados obtidos para ensaio de retração volumétrica com parcelas de areia de 88%, 50%, 25% e 0%.
Fonte: Adaptado dos dados de Kleppe e Olson (1985).



Dados das pesquisas de Boynton (1983) e Boynton e Daniel (1985) *apud* Daniel e Wu (1993) sugerem que as rachaduras provenientes de ressecamento são particularmente preocupantes para sistemas de cobertura finais, onde a sobrecarga aplicada ao solo de cobertura é baixa. Isto porque tensões de compressão geradas por carregamentos atuantes provenientes de sobrecargas aplicadas no revestimento de cobertura superior do aterro

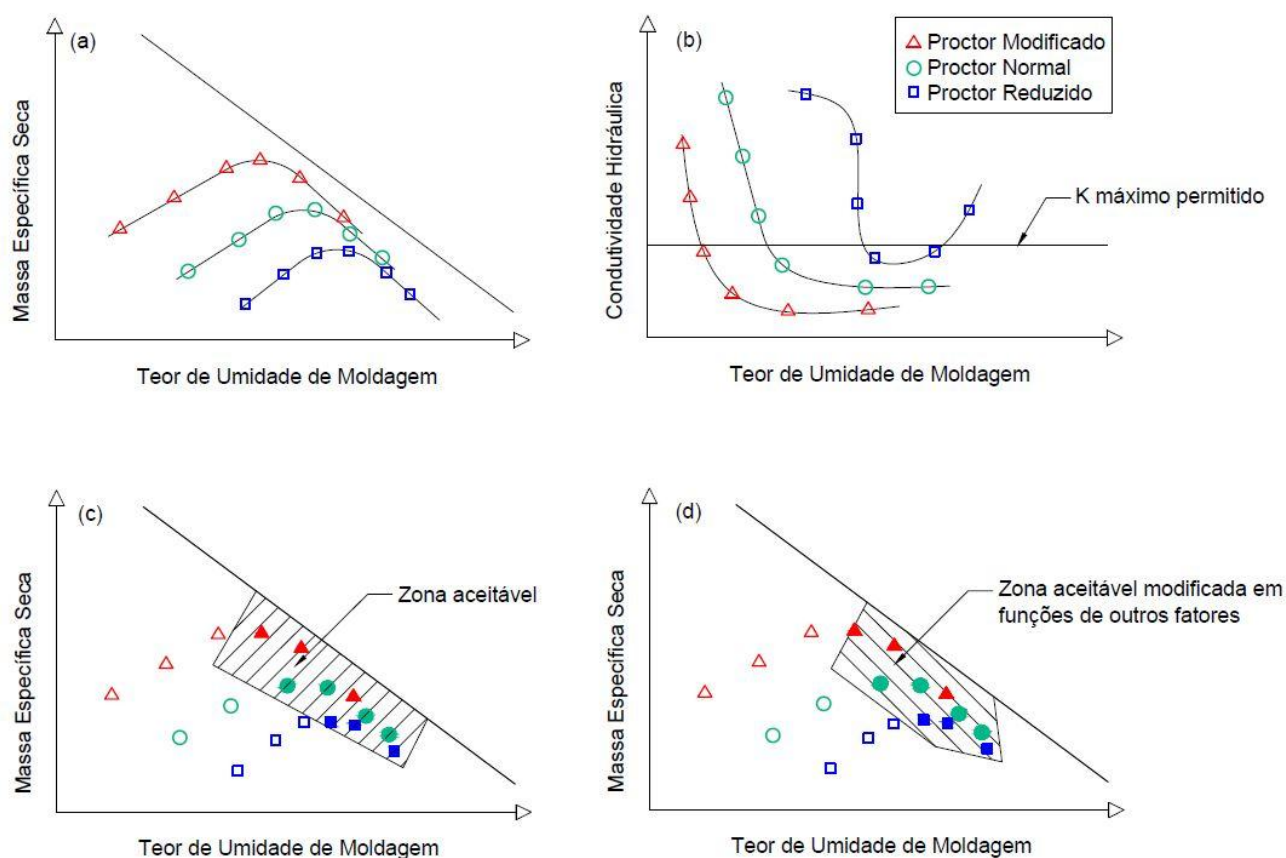
sanitário tendem a selar as fissuras originadas em processos de secagem, prevenindo o desenvolvimento e formação de novas fissuras.

Daniel e Benson (1990) descrevem um procedimento para determinar critérios de compactação em camadas de cobertura de solo. O procedimento (Figura 2.11) envolve compactação do solo em faixas de teor de água com diferentes energias de compactação, bem como definição de uma zona aceitável. Os autores também discutem como outros ensaios geotécnicos, além de testes de condutividade hidráulica, por exemplo, resistência à compressão, também pode ser usado para definir uma zona aceitável que satisfaça todos os critérios de interesse em um projeto.

O procedimento adotado por Daniel e Wu é explicado a seguir:

1. Executar ensaios de compactação no solo com três níveis de energia (modificado, padrão e reduzido), tal como recomendado por Daniel e Benson (1990). As curvas de compactação são mostradas na Figura 2.11 (a).
2. Caracterizar a condutividade hidráulica dos corpos de prova com os mesmos teores de umidade, massa específica seca e níveis de energia da curva de compactação (Figura 2.11 (b))
3. Reproduzir, de forma diferenciada, no gráfico de teor de umidade de moldagem x massa específica seca os pontos nos quais o critério de condutividade hidráulica ($k \leq 10^{-9}$ m/s) é alcançado (Figura 2.11 (c)).
4. Estabelecer, a partir de critérios específicos estabelecidos exclusivamente para o projeto, uma zona admissível no gráfico de teor de umidade de moldagem x massa específica, que atenda aos novos parâmetros (Figura 2.11 (d)).

Figura 2.11 - Procedimento para estabelecer a zona de teor de umidade e massa específica seca que atendam ao critério de condutividade hidráulica (k): (a) amostras compactadas em três energias diferentes; (b) determinação da permeabilidade das amostras; (c) desenho da zona de aceitação (símbolos sólidos representam amostras com valores aceitáveis de k); (d) zona de aceitável considerando outros critérios além da condutividade hidráulica. Fonte: Daniel e Benson (1990) – modificado.

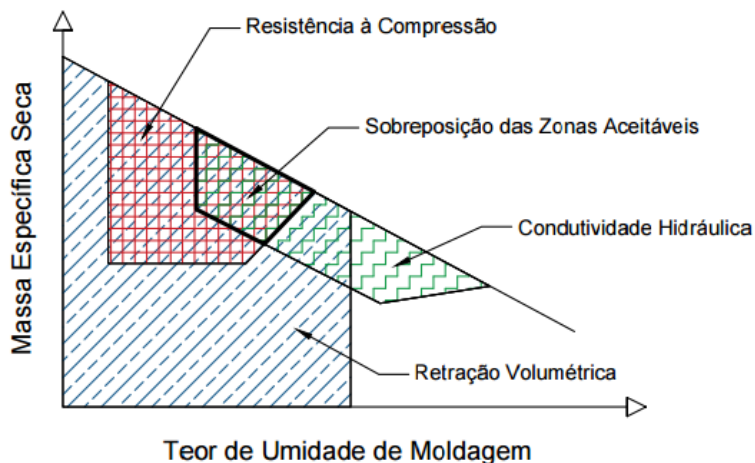


Daniel e Wu (1993) estabeleceram três critérios para a definição da zona aceitável na curva de compactação do solo para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários. O primeiro é definido pela permeabilidade do solo, a mesma não poderia exceder o limite de 1×10^{-9} m/s, o segundo era definido pela retração volumétrica, definindo-se o limite máximo como 4%, e o terceiro critério era estabelecido com base na resistência à compressão simples ou não confinada, obtendo-se como limitação inferior o patamar de 200 kPa.

O objetivo final era relacionar critérios relativos ao processo de compactação (teor de umidade e massa específica seca) para a condutividade hidráulica (máximo de 1×10^{-9} m/s), retração volumétrica no processo de secagem (máxima de 4%), e resistência à compressão não confinada (mínimo de 200 kPa [30 psi]). Foi feita uma tentativa de definir

uma zona aceitável para cada critério e, por sobreposição, definir uma zona geral aceitável que satisfizesse os três critérios como mostrado na figura 2.12.

Figura 2.12 - Zona de aceitação. Fonte: Daniel e Wu (1993) - modificado.



A partir do metodologia de Daniel e Wu (1993) e dos dados de Costa (2015) foram definidos os limites para aplicação do processo de definição de zonas aceitáveis para compactação do solo escolhido para esta pesquisa em camadas de cobertura de aterros sanitários. Foram estabelecidos para esta pesquisa três critérios para avaliação da aplicabilidade do solo presente no Aterro Sanitário Oeste em camadas de cobertura, sendo eles:

- Condutividade hidráulica inferior à 1×10^{-7} m/s. A partir do conhecimento da permeabilidade obtida para o mesmo solo por Costa (2015) foi definido o valor máximo para a permeabilidade de 1×10^{-7} m/s, magnitude aceita pelo US.EPA (2004) como valor limite para permeabilidade do solo da camada de cobertura para aterros de resíduos sólidos urbanos.
- Retração volumétrica inferior à 4%. Sabendo-se que a retração volumétrica causada por ressecamento não poderia ser excessiva foi estabelecido a partir das constatações obtidas por Kleppe e Olson (1985), definindo-se como 4% o valor limite para variação volumétrica dos solos estudados em virtude da abertura de fissuras no processo de secagem.
- Resistência à compressão não confinada superior à 200 kPa. A resistência à compressão deve ser superior a um valor mínimo razoável, visto que, solos

compactados utilizados para sistemas de revestimento e cobertura devem ter resistência adequada às condições de carregamento submetido.

2.6. CENÁRIO DO ESTUDO - ATERRO SANITÁRIO OESTE

Segundo o Serviço de Limpeza Urbana – SLU (2015), o futuro Aterro Sanitário Oeste - ASO, estará localizado entre as regiões administrativas de Samambaia e de Ceilândia. O projeto foi contratado pelo Programa Brasília Sustentável, vinculado à Agência Reguladora de Águas e Energia do Distrito Federal – ADASA, sendo projetado em 2012 pela empresa Cepollina Engenheiros Consultores S.A.

A área total do empreendimento é de aproximadamente 760.000 m² (76 ha), sendo o espaço para implantação do ASO de aproximadamente 490.000 m² (49 ha). A região contempla as áreas de disposição de rejeitos, 320.000 m² (32 ha), e de apoio administrativo e operacional, o poço de recalque de chorume para a Estação de Tratamento de Esgoto Melchior, operada pela CAESB, e a área para disposição emergencial de resíduos de serviços de saúde. Como acréscimo ao projeto, adjacente ao ASO existe uma gleba prevista para a ampliação do aterro. Essa gleba tem aproximadamente 600.000 m² (60 ha). Com essas duas glebas, a dimensão total do Aterro Sanitário Oeste passa a ser de aproximadamente 1.360.000 m² (136 ha).

O projeto prediz a segmentação da disposição de rejeitos no Aterro Oeste em quatro etapas. A Tabela 2.2 sistematiza a área de cada fase, sua capacidade de continência de resíduos e sua vida útil estimada.

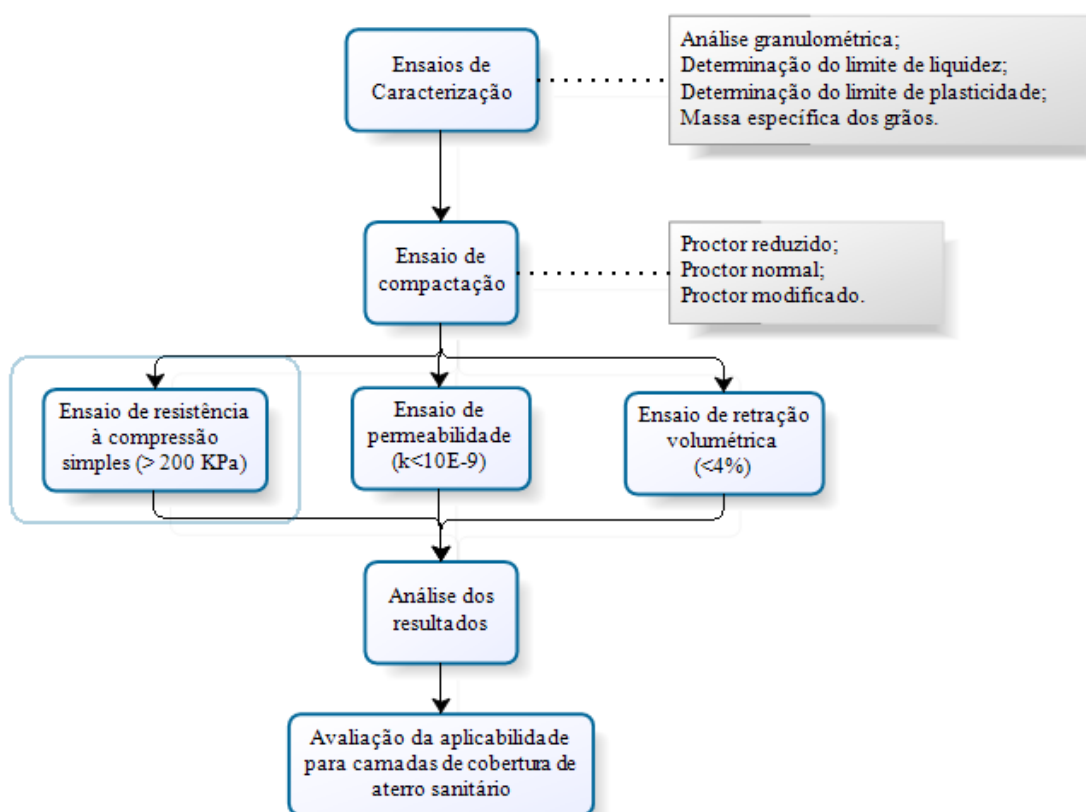
Tabela 2.2 - Etapas da construção do Aterro Sanitário Oeste no Distrito Federal. Fonte: SLU, 2015.

Etapas	Área (m²)	Capacidade (t)	Vida Útil (anos)
Etapa 1	110.000	1.872.000	3,1
Etapa 2	122.000	1.990.000	3,2
Etapa 3	88.000	1.596.000	2,6
Etapa 4 – Coroamento	-	2.672.000	4,4
Total	320.000	8.130.000	13,3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Toda a programação experimental foi baseada na metodologia adaptada da estrutura e procedimentos de Daniel e Wu (1993), sendo a mesma, dividida neste trabalho em duas etapas. Na primeira etapa foi feita a caracterização do solo utilizado na pesquisa. Na segunda, foram avaliadas as propriedades hidráulicas e mecânicas do solo com a realização de ensaios de compactação, permeabilidade, resistência à compressão e retração volumétrica. O fluxograma do programa experimental é mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma do programa experimental.



3.1. MATERIAL SELECIONADO PARA A PESQUISA

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no local onde está sendo construído o Aterro Sanitário Oeste, na Região Administrativa de Samambaia, Distrito Federal. As coordenadas do local são 15°51'39.9"S e 48°09'13.8"W, entre o córrego Melchior e a Rodovia DF 180, km 52, próximo à ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) de Samambaia (Figura 3.2) (Ahualli & Carmo, 2014).

Figura 3.2 - Localização do ponto de coleta. Fonte: Google Maps.



3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Os ensaios da etapa de caracterização do solo foram feitos por Costa (2015), exceto pelo ensaio de massa específica dos grãos, sendo o solo inicialmente seco, destorreado, homogeneizado e preparado para os ensaios de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986). Para caracterização do solo foram realizados os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica por peneiramento, conforme recomendações da norma NBR 7181 (ABNT, 1984-a), e utilizando granulômetro a laser, modelo MICROTRAC S 3500, com e sem ultrassom;
- Determinação do Limite de Liquidez – NBR 6459 (ABNT, 1984-b) e do Limite de Plasticidade de Solos – NBR 7180 (ABNT, 1984-c);
- Massa específica dos grãos realizada com equipamento penta-picnômetro, do fabricante Quantacrome Instruments. Neste ensaio as amostras foram previamente secas em estufa à 60°C, durante 16 horas. Posteriormente, foram colocadas em cápsulas, com determinação de suas massas com precisão de 0,0001g. O aparelho usa injeção de gás hélio, ao invés de água. O gás preenche os vazios e pelo volume de gás injetado, o volume ocupado pela massa da amostra é calculado. O aparelho

permite ensaiar até cinco amostras simultaneamente. O resultado foi obtido a partir da média de dez determinações para a amostra de solo.

3.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO SOLO

O objetivo desta etapa da pesquisa foi analisar o comportamento hidráulico e mecânico dos materiais tendo em vista sua utilização em camadas de cobertura de aterros sanitários. Desta forma, foram realizados ensaios de compactação, permeabilidade, resistência à compressão simples e retração volumétrica em amostras do solo.

3.3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para preparação das amostras para os ensaios de determinação das propriedades hidráulicas e mecânicas do solo as amostras foram inicialmente destorroadas, passando integralmente pela peneira com abertura de 4,8 mm. O material destorroadado foi inicialmente seco ao ar e, posteriormente, foi determinada sua umidade higroscópica, de modo a possibilitar a correção da quantidade de água a ser acrescentada às amostras. Em seguida à moldagem do solo para os ensaios posteriores, as amostras foram identificadas e deixadas em processo de homogeneização por 24 horas em câmara úmida, acondicionada por sacos plásticos.

3.3.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Inicialmente, foi feito o ensaio de compactação para três energias de compactação, com o intuito de definir três pontos em cada curva para a execução dos demais ensaios previstos. O ensaio de compactação foi realizado para três energias de compactação diferentes, sendo elas: *Proctor* Normal, Modificado e Reduzido, sendo utilizado cilindro metálico pequeno, sem reuso de material.

A preparação das amostras seguiu as especificações demonstradas no item 3.3.1., para obtenção de, no mínimo, cinco pontos para cada curva de compactação, sendo dois no ramo seco, um próximo à umidade ótima e mais dois no ramo úmido.

Para a realização do ensaio foram seguidas as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986a), para o *Proctor* Normal e Modificado. Já o ensaio com *Proctor* Reduzido foi realizado simulando o *Proctor* Normal e sua subsequente norma, com alteração no número de golpes aplicados por camada, simulando um limite inferior no esforço de compactação em campo, sendo aplicados 15 golpes por camada. A Tabela 3.1. traz informações a respeito dos parâmetros utilizados em cada uma das energias de compactação.

Tabela 3.1 - Parâmetros característicos às energias de compactação.

Cilindro	Características inerentes à cada energia de compactação	<i>Proctor</i>		
		Reduzido	Normal	Modificado
Pequeno	Soquete	Pequeno	Pequeno	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	15	26	27

Com a amostra preparada, procedeu-se a preparação dos equipamentos para o ensaio de compactação. Primeiramente, mediu-se as dimensões e o peso do cilindro pequeno escolhido para compactação. Em seguida, o cilindro foi untado com vaselina. Procedeu-se então a compactação.

É importante salientar que, entre uma camada e outra, o corpo de prova era escarificado de forma a aumentar o atrito entre a camada atual com a camada sobrejacente. Terminado o processo de compactação, o colarinho era retirado e a porção da amostra acima do limite do cilindro era regularizada com o auxílio de régua. O conjunto cilindro/amostra foi pesado com auxílio de uma balança com precisão mínima de 1g.

A umidade do corpo de prova foi retirada a partir da amostra de solo restante, contida no saco onde foi feita a homogeneização. O saco que continha a amostra era selado imediatamente após a retirada de material para a compactação de cada camada. A Figura 3.3 demonstra alguns dos processos para execução do ensaio e posterior extração do corpo de prova para subseqüentes ensaios.

Figura 3.3 - Sequência de execução do ensaio de compactação: (a) amostra sendo compactada com auxílio de soquete; (b) detalhe da escarificação ao final de uma camada compactada; (c) extração do corpo de prova com o auxílio de macaco hidráulico. Fonte: Acerto pessoal.



(a)

(b)

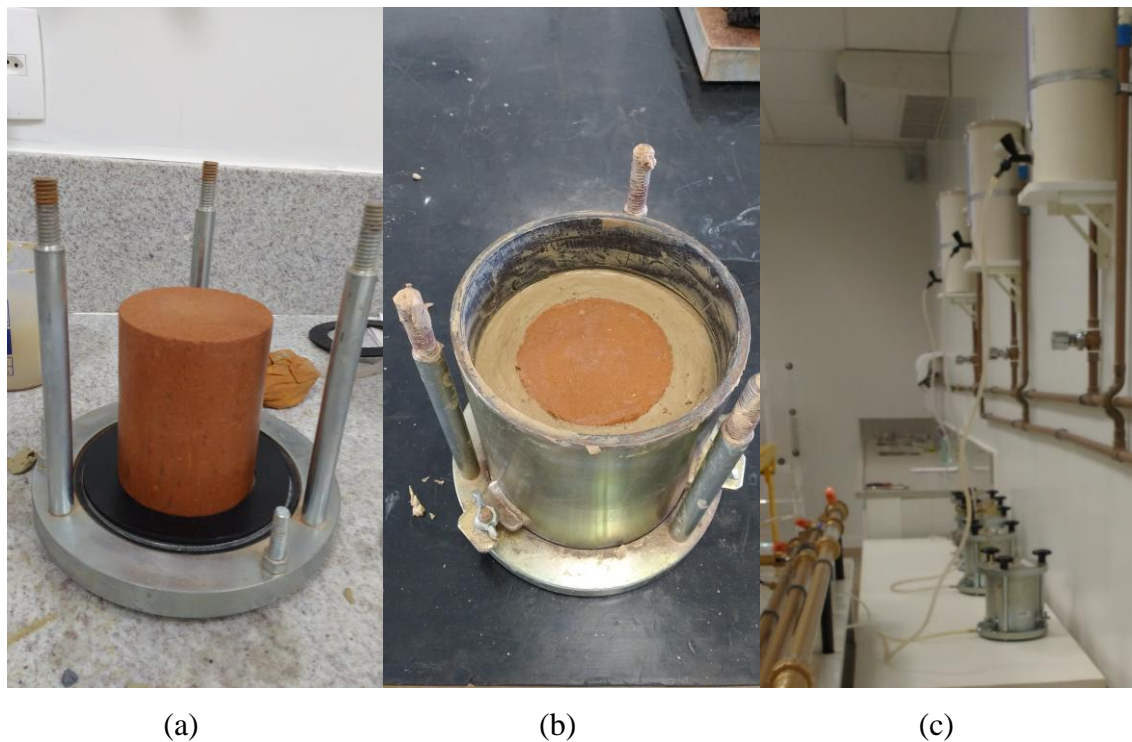
(c)

3.3.3. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Após a realização dos ensaios de compactação e com a definição das curvas para cada uma das três energias de compactação, foram moldados três corpos de prova utilizando o cilindro metálico pequeno, sendo um com umidade referente ao ramo seco, o segundo na umidade ótima e o último referente à umidade no ramo úmido, totalizando 9 amostras, seguindo as mesmas prescrições dos itens 3.3.1. e 3.3.2.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados em permeâmetros de parede rígida, à carga variável, conforme recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2000). Os ensaios foram realizados em tempos variados após a compactação em virtude da indisponibilidade imediata para todos os 9 corpos de prova serem ensaiados, neste entretempo os corpos de prova foram embalados com papel filtro e guardados em câmara úmida. A Figura 3.4 demonstra a sequência para execução do ensaio de permeabilidade.

Figura 3.4 - Montagem do ensaio de permeabilidade à carga variável: (a) amostra compactada colocada em posição no permeâmetro; (b) corpo de prova envolto por bentonita no permeâmetro; (c) corpos de prova em processo de saturação. Fonte: Acervo pessoal.



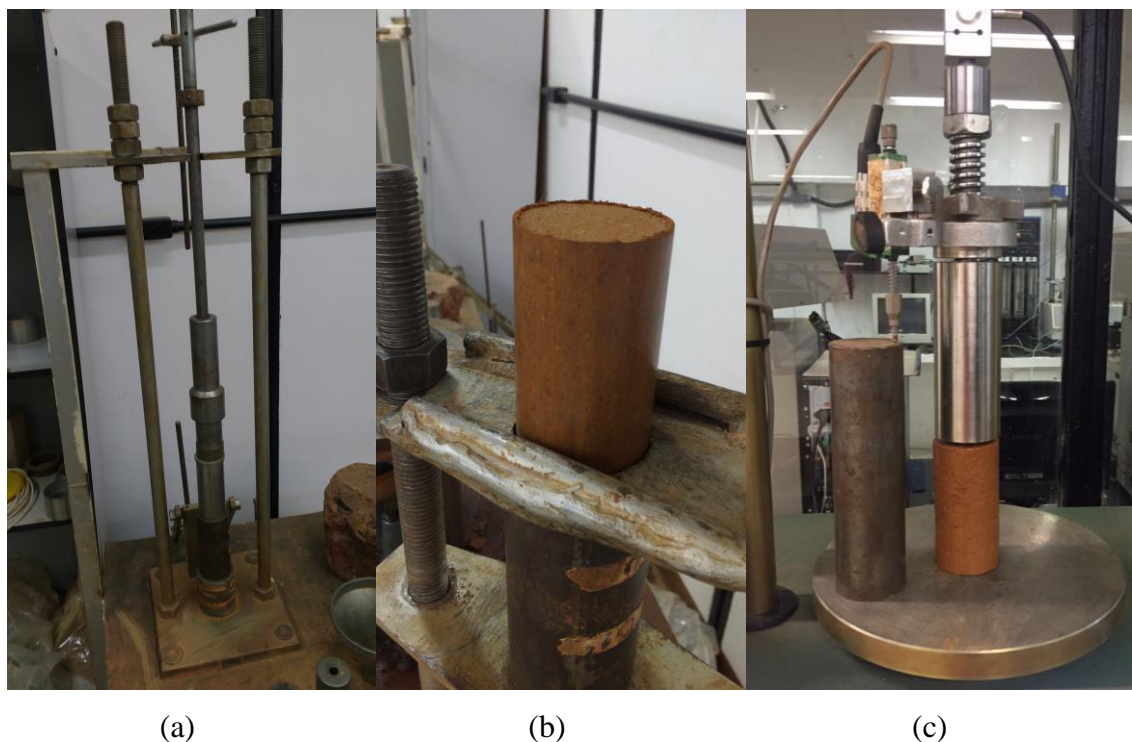
3.3.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Para os ensaios de resistência à compressão simples foi moldado um corpo de prova cilíndrico, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para cada uma das três umidades descritas no item 3.3.3. das três energias distintas de compactação, totalizando 9 amostras. A execução do ensaio foi regida segundo às recomendações da NBR 12770 (ABNT, 1992).

A preparação do solo foi feita segundo o item 3.3.1. Para moldagem dos corpos de prova, o material foi pesado antes de colocado no cilindro de mini-compactação, depois o solo foi comprimido até a espessura de 2 centímetros pelo soquete do ensaio de mini-compactação. A quantidade de solo em cada camada foi controlada pela pesagem do material necessário, obtido a partir do volume, umidade e massa específica seca conhecidos e definidos a partir das curvas de compactação. Foram produzidas 5 camadas dentro da forma do corpo de prova, atingindo a altura de 10 cm, escarificando-se a amostra de solo entre as camadas. Após a compactação foram aferidas a massa e as dimensões dos corpos de prova. As amostras foram rompidas na mesma data da

moldagem em uma prensa CBR/Marshall, com velocidade de 1,27 mm/min. A Figura 3.5 demonstra a moldagem do corpo de prova.

Figura 3.5 - Sequência do processo de moldagem e execução do ensaio de RCS: (a) corpo de prova sendo moldado com auxílio do equipamento de mini-compactação; (b) extração da amostra com macaco hidráulico; (c) montagem do ensaio de RCS. Fonte: Acervo pessoal.



Imediatamente após a moldagem, os corpos de prova foram rompidos para verificação da resistência à compressão simples. Após a ruptura foram verificadas as unidades de todos os corpos de prova.

3.3.5. ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

O ensaio de retração volumétrica seguiu a metodologia de Quissini (2009) adaptando o método à etapa de secagem, e não aos ciclos de absorção e secagem propostos na metodologia original, e teve como objetivo avaliar o comportamento do solo quando exposto às condições ambientais do laboratório. Foram moldados três corpos de prova cilíndricos para cada uma das três unidades descritas no item 3.3.3., com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, para cada uma das curvas de compactação, totalizando 27 amostras, seguindo em cada trio de amostras os parâmetros de umidade e massa específica aparente seca determinadas no ensaio de compactação. Os corpos de prova foram

compactados estaticamente com auxílio de um pistão, em uma única camada de 2 cm. Os corpos de prova foram deixados expostos a secagem ao ar, sendo medidas, em intervalos de aproximadamente 3 dias, as variações das dimensões destas amostras, bem como suas massas, a fim de obter uma curva de tempo x variação de volume e outra de curva de tempo x variação de massa, até que os mesmos se estabilizassem. Foram feitas marcações em cada corpo de prova com o intuito de que todas as medições fossem aferidas no mesmo local em virtude das deformidades do corpo de prova. Figura 3.6 mostra o molde utilizado para produzir os corpos de prova (Santos e Silva, 2015) e a Figura 3.7 apresenta detalhes da sequência de moldagem e aferição das medidas dos corpos de prova.

Figura 3.6 - Esquema do ensaio de retração volumétrica. Fonte: Santos e Silva (2014 *apud* Santos e Silva, 2015).

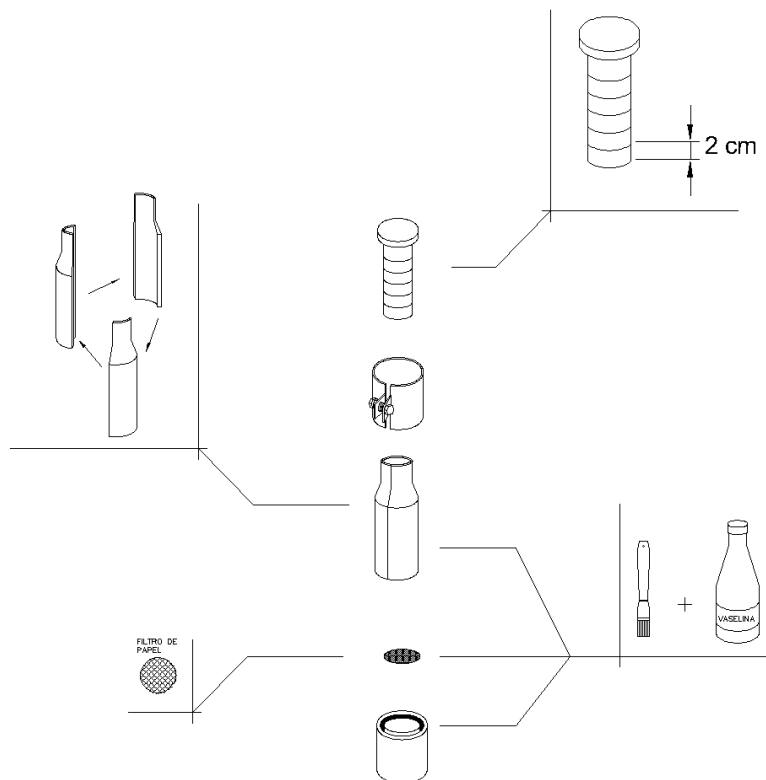


Figura 3.7 - Execução do ensaio de retração volumétrica: (a) amostra previamente pesada sendo inserida no cilindro de compactação; (b) extração do corpo de prova; (c) detalhe da aferição das dimensões do corpo de prova e da marcação do mesmo. Fonte: Acervo pessoal



(a)

(b)

(c)

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A apresentação e análise dos dados obtidos está dividida em três subitens: No primeiro, são mostrados os dados e a avaliação dos dados referentes à etapa de caracterização do solo, no segundo são apresentados os parâmetros referentes à análise das propriedades hidráulicas e mecânicas do solo e no terceiro é apresentado a aplicação dos dados à metodologia proposta por Daniel e Wu (1993).

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios apresentados referentes à caracterização do solo estudado foram retirados de Costa (2015), exceto pelo ensaio de massa específica dos grãos.

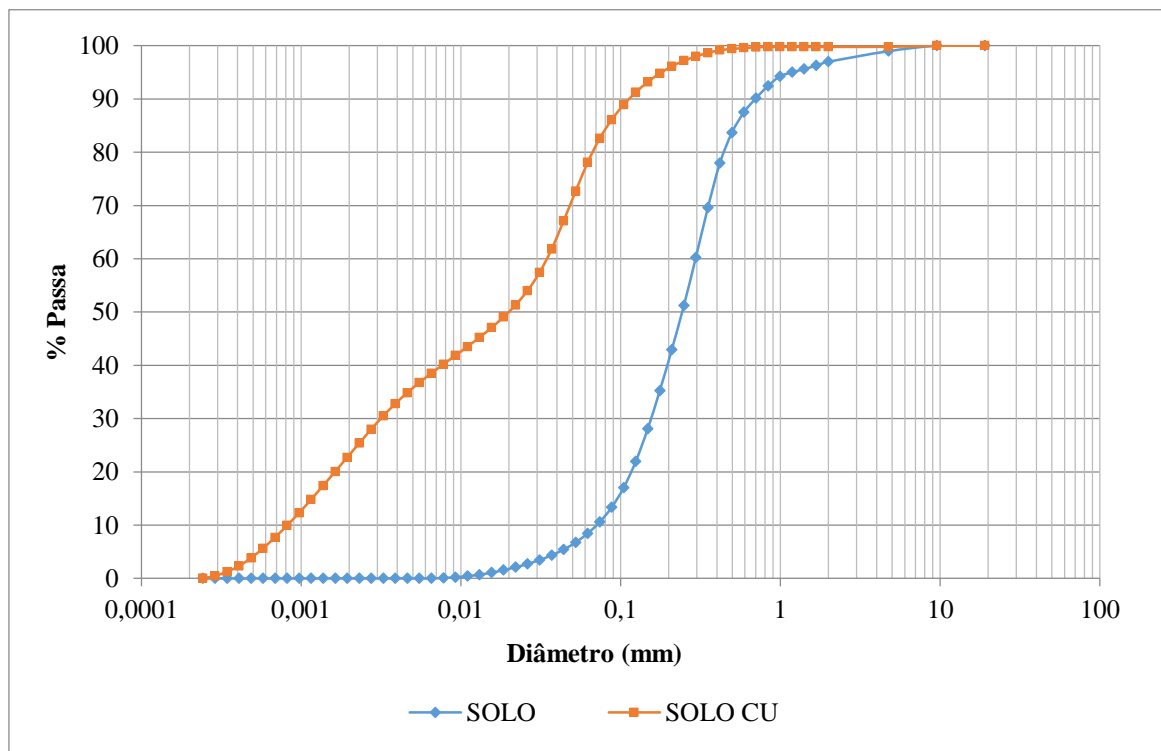
4.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os resultados relativos à análise granulométrica por com granulômetro a laser demonstram que grande parte constituinte do solo possui granulometria grosseira sem a utilização de ultrassom, enquanto com o uso do ultrassom nota-se que a o solo se apresentam com granulometria fina, considerando a metodologia de Pinto (2006) para a classificação unificada, a partir do critério dos finos (considera-se os finos que passam pela peneira nº 200, com abertura de 0,075 mm, se a porcentagem for inferior a 50 o solo é classificado como solo de granulação grosseira, do contrário é classificado como de granulação fina), os dados são apresentados na Tabela 4.1. A Figura 4.1 demonstra os resultados referentes a partir do uso de granulômetro a laser. Nota-se que cerca de 86% das partículas de solo possuem diâmetro entre 0,1 e 1 mm na curva sem ultrassom, enquanto naquela com utilização do ultrassom observa-se que cerca de 12% do material encontra-se nesse mesmo intervalo, inferindo-se que existem agregações que são desfeitas pelos efeitos físicos do ultrassom (Costa 2015).

Tabela 4.1 - Frações granulométricas do solo. Fonte: Costa (2015).

Material Faixa granulométrica (mm)	% do material sem ultrassom	% do material com ultrassom
20,0 < Pedregulho grosso < 60,0	0,0	0,0
6,0 < Pedregulho médio < 20,0	0,0	0,0
2,0 < Pedregulho fino < 6,0	0,0	0,0
0,6 < Areia grossa < 2,0	12,0	0,0
0,2 < Areia média < 0,6	48,0	5,0
0,06 < Areia fina < 0,2	32,0	18,0
0,002 < Silte < 0,06	8,0	54,0
Argila < 0,002	0,0	23,0

Figura 4.1 - Curvas granulométricas do solo, com e sem ultrassom. Fonte: Costa (2015).



4.1.2. LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE

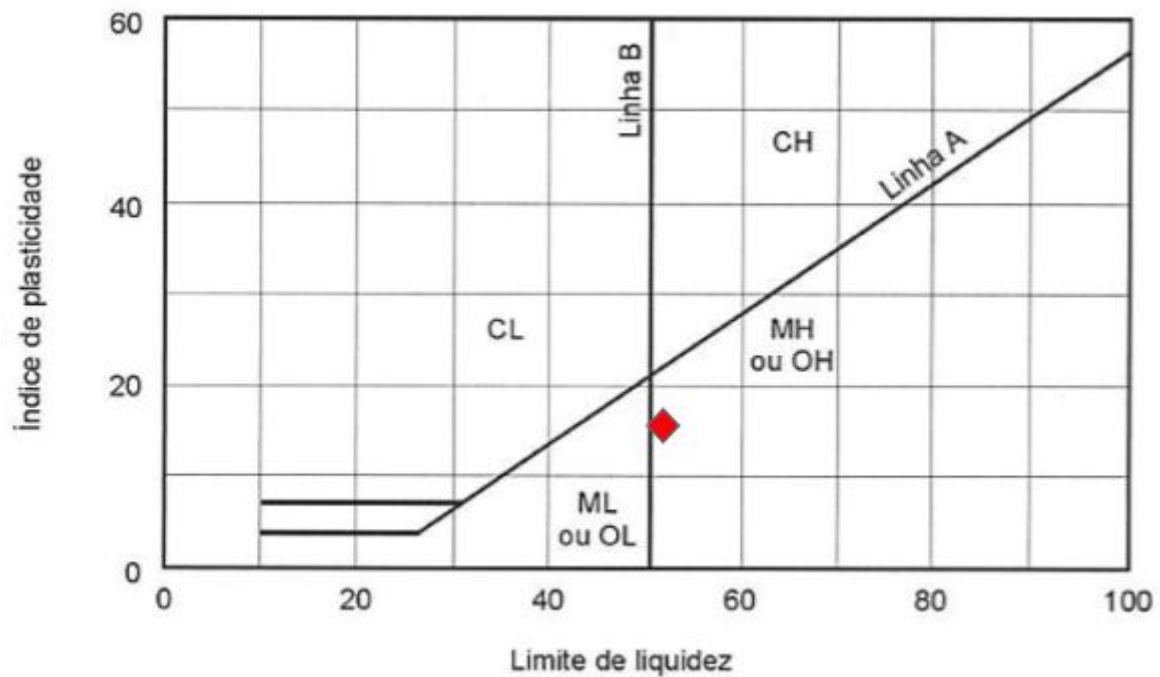
Os resultados dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade são apresentados na Tabela 4.2 juntamente com índice de plasticidade do solo.

Tabela 4.2 - Resultado dos ensaios de consistência para o solo. Fonte: Costa (2015).

W _L (%)	W _P (%)	IP (%)
52%	35%	17%

A partir dos resultados dos limites de Atterberg e considerando-se a carta de plasticidade de Casagrande, percebe-se que a classificação do solo se enquadra como MH, ou seja, silte de alta compressibilidade (Figura 4.2).

Figura 4.2 - Carta de plasticidade com indicação do ponto correspondente ao solo. Fonte: Pinto (2006) – modificado.



4.1.3. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

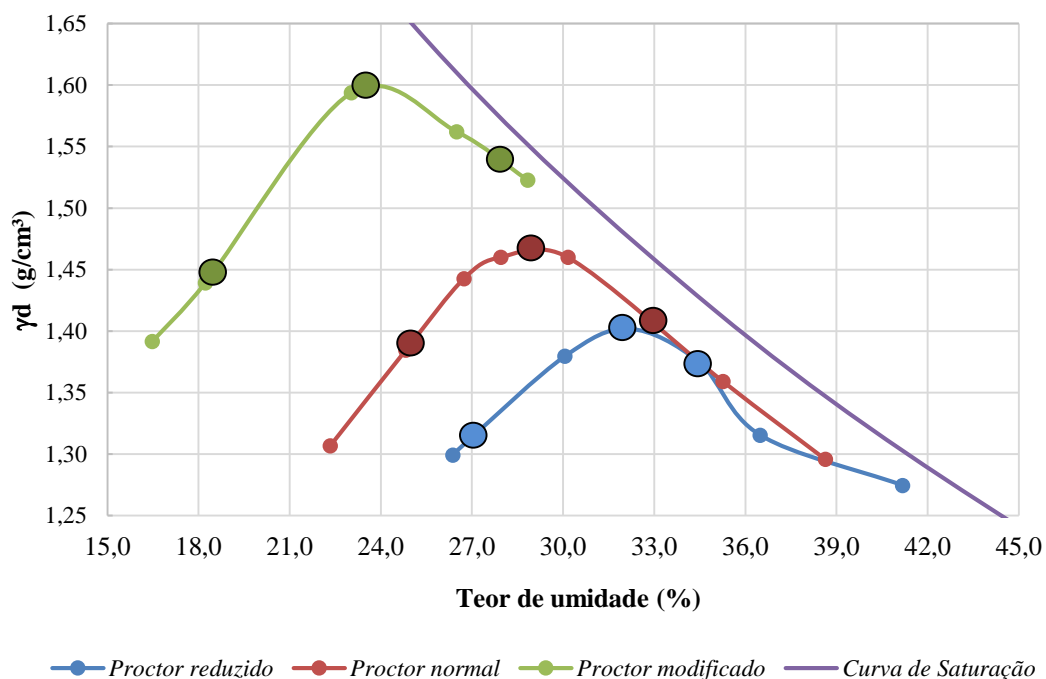
O resultado para o ensaio de massa específica dos grãos fornece o valor de 2,81 g/cm³.

4.2. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO SOLO

4.2.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram realizados com amostras de solo para três diferentes energias de compactação. A partir das curvas, foram determinados nove pontos, três em cada curva de compactação, que posteriormente foram ensaiados nos parâmetros definidos para este programa experimental. A Figura 4.3 demonstra as curvas de compactação e a curva de saturação, bem como os pontos escolhidos para análise e a Tabela 4.3 expressa os parâmetros, de umidade, massa específica seca e energia de compactação, das amostras selecionadas.

Figura 4.3 - Curvas de compactação, curva de saturação e pontos estabelecidos para o programa experimental.



Os resultados dos ensaios demonstram que o aumento na energia de compactação desloca a curva para a esquerda e para cima, diminuindo a umidade do ponto e aumentando a massa específica seca.

Acerca da curva de compactação, Pinto (2006) afirma que a estrutura do solo depende da energia a ele aplicada e a umidade do solo no momento da compactação. Em função disso, o ramo da curva antes da umidade ótima, aqui retratado como ramo seco, possui baixa umidade fazendo com que, no processo de compactação, a atração face-aresta não seja vencida pela energia aplicada, ocasionando ao solo uma estrutura denominada como floculada. Já a seção da curva de compactação posterior à umidade ótima, aqui denominada de ramo úmido, devido a uma maior umidade, aumenta a repulsão entre as partículas do solo, orientando a conformação do solo compactado, resultando numa estrutura denominada dispersa.

Tabela 4.3 - Parâmetros dos nove pontos estabelecidos para o programa experimental.

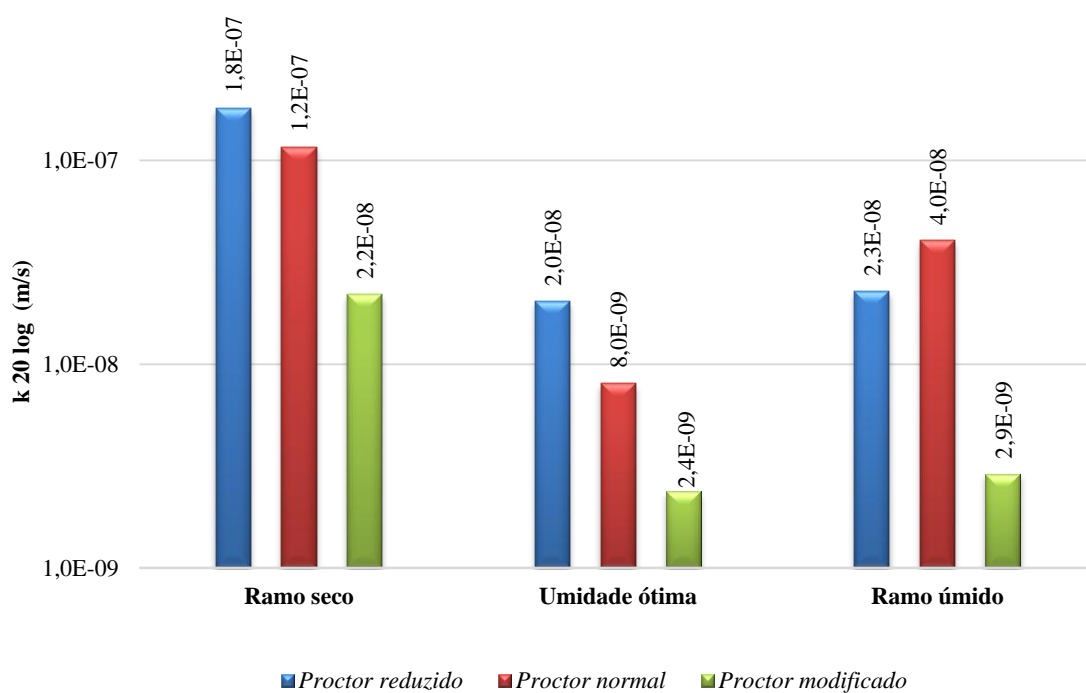
	<i>Proctor</i> reduzido			<i>Proctor</i> normal			<i>Proctor</i> modificado		
	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido
Umidade (%)	27,0%	32,0%	34,5%	25,0%	29,0%	33,0%	18,5%	23,5%	28,0%
γ_d (g/cm ³)	1,31	1,41	1,35	1,38	1,47	1,41	1,45	1,59	1,54
Energia de compactação (kg.cm/cm ³)	3,431			5,948			27,985		

4.2.2. ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Os resultados do ensaio de permeabilidade são apresentados na Figura 4.4. Em uma verificação curva a curva, percebe-se que a permeabilidade apresenta valores mínimos na umidade ótima, e, em se tratando dos extremos dos pontos analisados, observa-se uma maior permeabilidade no ramo seco. Os valores da permeabilidade do ramo úmido em relação à umidade ótima estão em 12% e 22% maiores para os *proctors* reduzido e modificado respectivamente, enquanto para o ramo seco essa relação está em média nove vezes maior do que a permeabilidade dos corpos de prova referentes à umidade ótima. Em relação ao *proctor* normal, esta variação apresenta-se de maneira mais expressiva, sendo a amostra relativa ao ramo úmido quatro vezes mais permeável que a amostra da umidade ótima e em relação ao ramo seco acima de quatorze vezes maior que o coeficiente de permeabilidade da umidade ótima do respectivo *proctor*.

O relação entre permeabilidade dos ramos, seco e úmido, constatada anteriormente é atribuída em virtude da estrutura do solo compactado em cada ramo. A estrutura floculada, característica representante do ramo seco, propicia uma maior facilidade de percolação da água, do que a estrutura dispersa, correspondente ao ramo úmido (Pinto, 2006). Para demonstrar a magnitude dessa variação em alguns solos, Pinto (2006) denota que para amostras de umidade 2,5% menores que a umidade ótima e com cerca de 95% da densidade máxima os valores do coeficiente de permeabilidade apresentam-se 10 vezes maiores que na umidade ótima.

Figura 4.4 - Variação dos coeficientes de permeabilidade (k_{20}) para as amostras.



Conforme os limite estabelecidos no item 2.5 desta pesquisa, nota-se que os pontos referentes aos *proctors* reduzido e normal no ramo seco foram reprovados no critério de aprovação de permeabilidade máxima igual a 1×10^{-7} m/s.

A Tabela 4.4 expressa os dados relativos aos corpos de prova ensaiados à permeabilidade responsáveis pelos resultados obtidos acima.

Tabela 4.4 - Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade para o solo.

<i>Proctor</i>	Amostra	Umidade de moldagem (%)	γ_d (g/cm ³)	GC (%)	e	Sr (%)	k ₂₀ (m/s)
Reduzido	Ramo seco	27,0	1,31	92,91	1,14	66,41	1,8E-07
	Umidade ótima	32,2	1,40	99,29	1,00	89,91	2,0E-08
	Ramo úmido	34,5	1,37	97,16	1,04	92,69	2,3E-08
Normal	Ramo seco	26,0	1,41	95,92	0,99	73,93	1,2E-07
	Umidade ótima	28,6	1,43	97,28	0,96	83,38	8,0E-09
	Ramo úmido	32,4	1,39	94,56	1,02	89,42	4,0E-08
Modificado	Ramo seco	18,3	1,44	90,00	0,95	54,07	2,2E-08
	Umidade ótima	23,0	1,59	99,38	0,76	84,72	2,4E-09
	Ramo úmido	29,5	1,50	93,75	0,87	94,71	2,9E-09

4.2.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

O ensaio de resistência à compressão não confinada teve por objetivo avaliar a capacidade do solo pesquisado em resistir à solicitações para os pontos nas curvas de compactação escolhidos no item 4.2.1. A Tabela 4.5 demonstra as umidades representativas dos ramos seco, úmido e da umidade ótima para os ensaios de resistência à compressão simples.

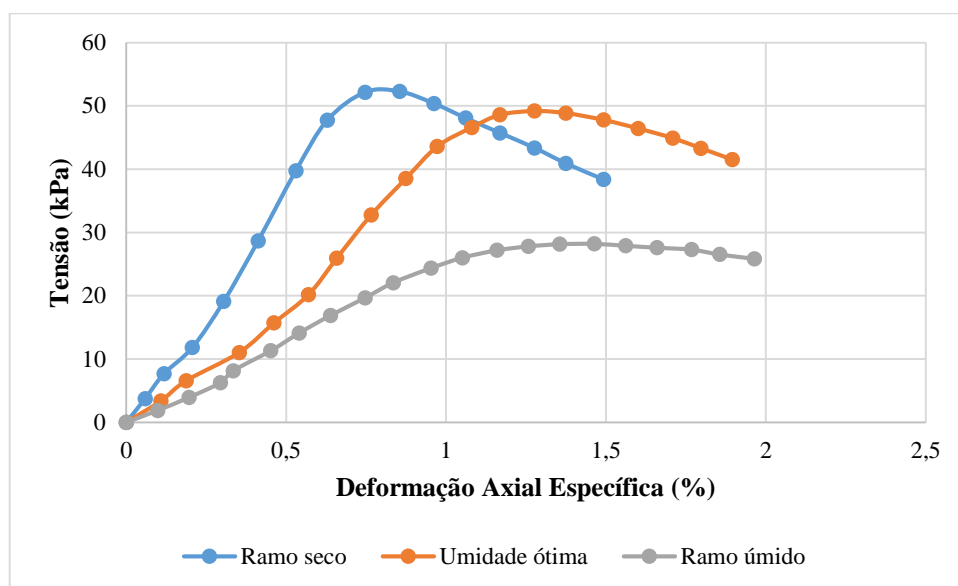
Tabela 4.5 - Teor de umidade de moldagem das amostras do ensaio de resistência à compressão simples.

	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido
<i>Proctor</i> reduzido	27,1%	31,9%	35,5%
<i>Proctor</i> normal	25,3%	29,7%	33,9%
<i>Proctor</i> modificado	19,3%	24,3%	28,3%

a) *Proctor* reduzido

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples para as amostras de solo compactadas com energia reduzida (Figura 4.5). Os valores de resistência máxima sofreram uma diminuição a medida em que o teor de umidade de moldagem aumentou, sendo eles 52 kPa para o ramo seco, 49 kPa para a umidade ótima e 28 kPa para o ramo úmido. Nota-se que a proporção que o teor de umidade aumentava, também aumentou-se a deformação axial específica até a ruptura.

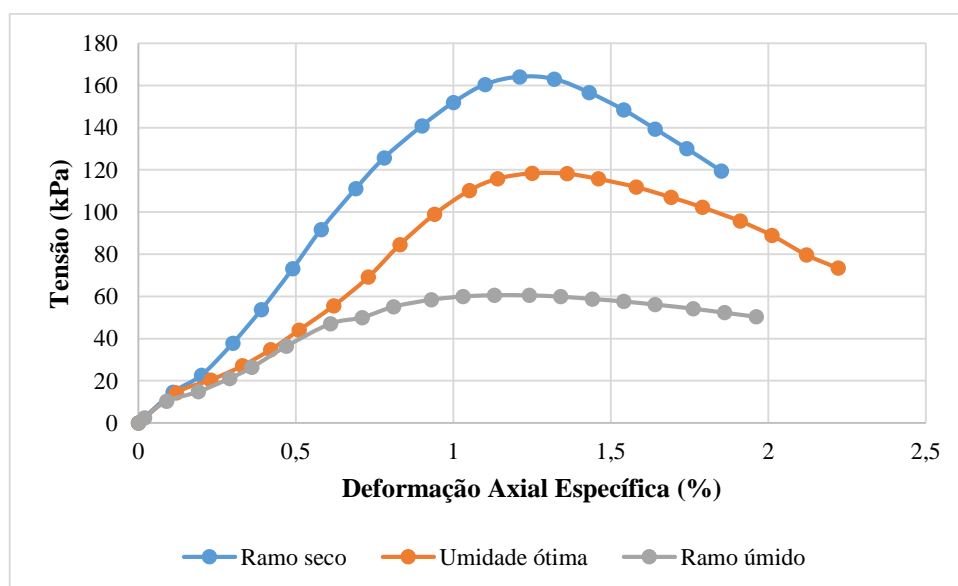
Figura 4.5 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo compactado com energia reduzida.



b) *Proctor* normal

A Figura 4.6 mostra os resultados do ensaio de RCS para as amostras de solo compactadas com energia de compactação normal. Os valores de resistência máxima diminuiram com o incremento de água na moldagem do solo, apresentando-se na ordem de 164 kPa, para o ramo seco, 118 kPa para a umidade ótima e 61 kPa para o ramo úmido.

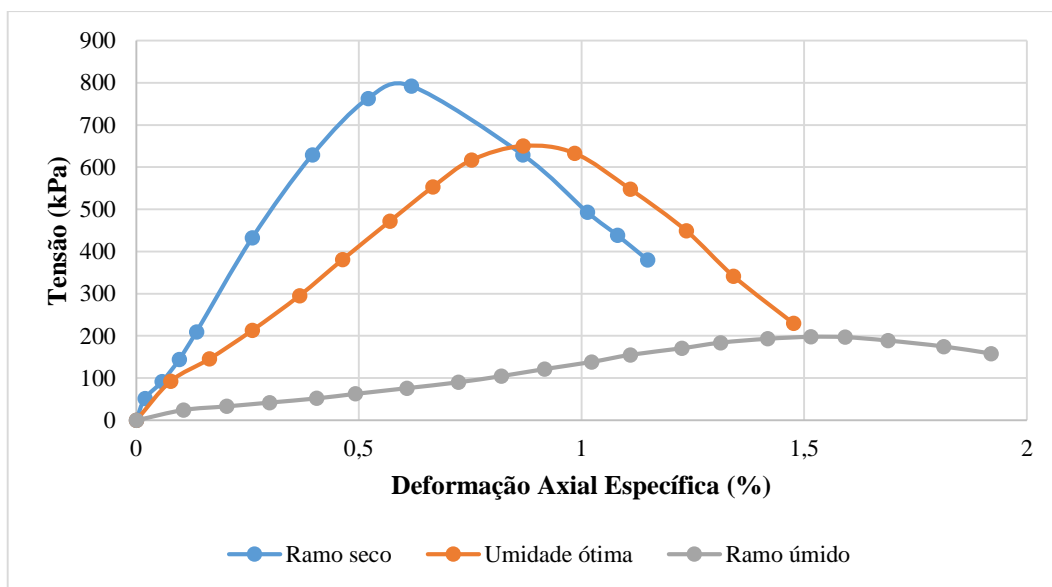
Figura 4.6 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo compactado com energia normal.



c) *Proctor* modificado

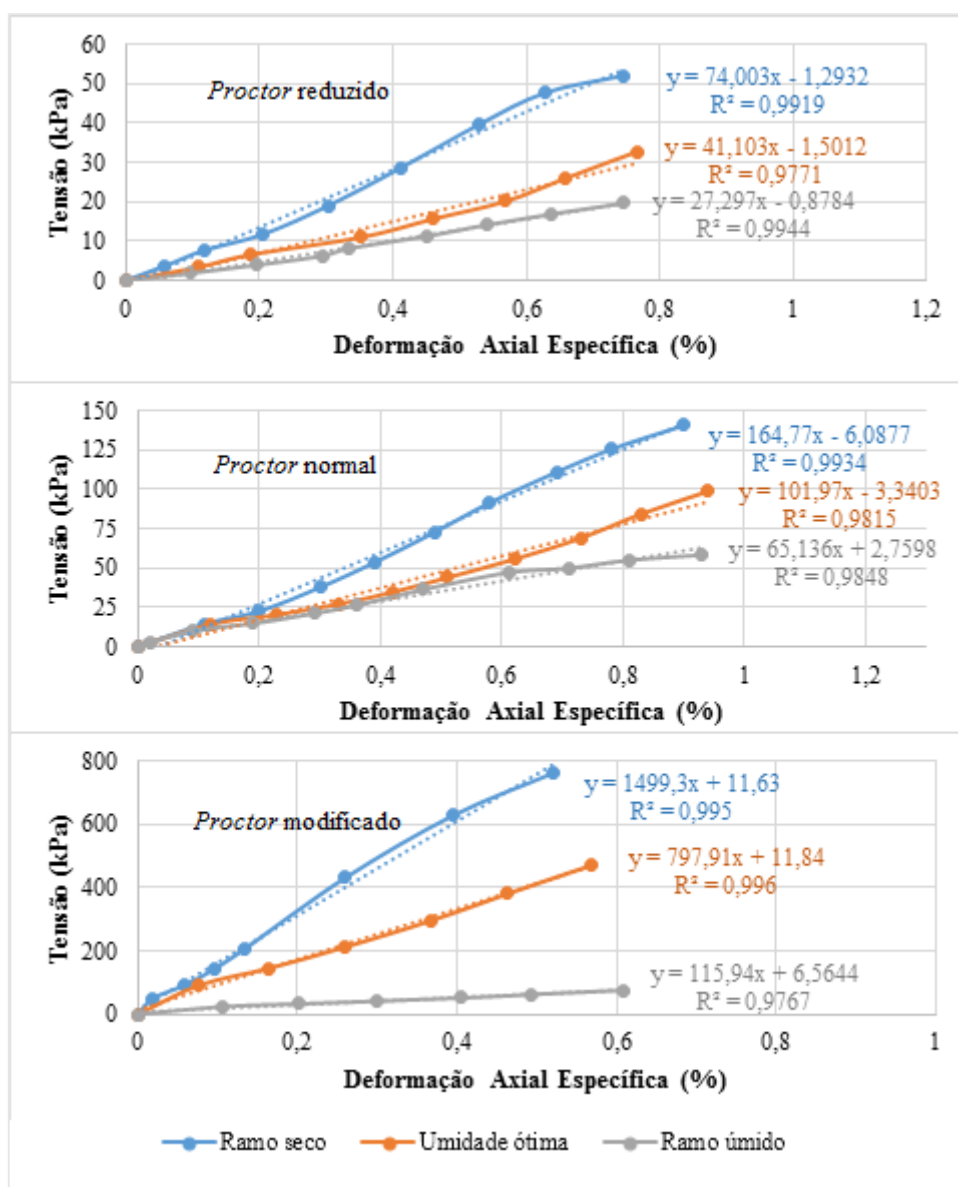
Os resultados do ensaios de resistência à compressão simples para amostras compactadas com energia modificadas são mostrados na Figura 4.7. Para a energia modificada os valores de tensão última encontrados foram os maiores em relação às outras energias, sendo de 792 kPa, para o ramo seco, 650 kPa para a umidade ótima e 201 kPa para o ramo úmido. As deformações axiais específicas se apresentaram maiores à medida em que o teor de umidade de moldagem crescia.

Figura 4.7 - Curvas Tensão x Deformação para ensaio de RCS para o solo compactado com energia modificada.



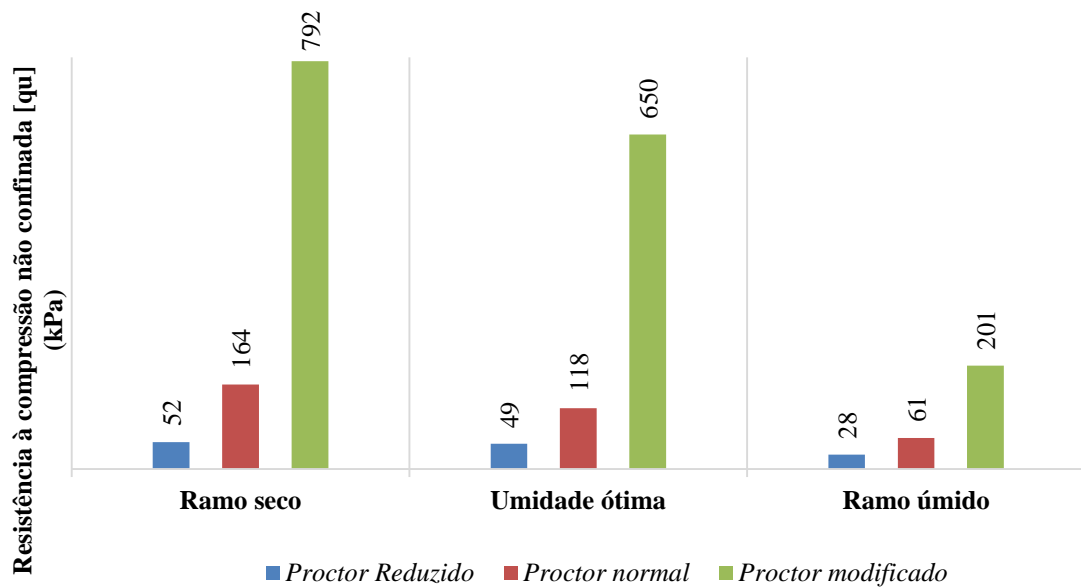
O módulo de elasticidade, representado pela inclinação da reta que define o ramo elástico do diagrama Tensão x Deformação, pode ser observado na Figura 4.8 que demonstra a variação do mesmo para as diferentes umidades nas diferentes energias de compactação estudadas. Percebe-se que a o módulo de elasticidade, apresentado na figura como a inclinação da linha de tendência de cada uma das retas representadas, aumenta à medida que decresce o teor de umidade de moldagem em cada uma das energias representadas. Em uma análise específica de cada ramo, percebe-se que o módulo de elasticidade cresce à proporção que amplia-se a energia de compactação.

Figura 4.8 - Variação do módulo de elasticidade para as amostras.



A Figura 4.9 demonstra os dados dos ensaios de resistência à compressão simples compilados para as três energias de compactação. Observa-se para cada ramo que a resistência à compressão simples aumentou à medida em que a energia de compactação crescia.

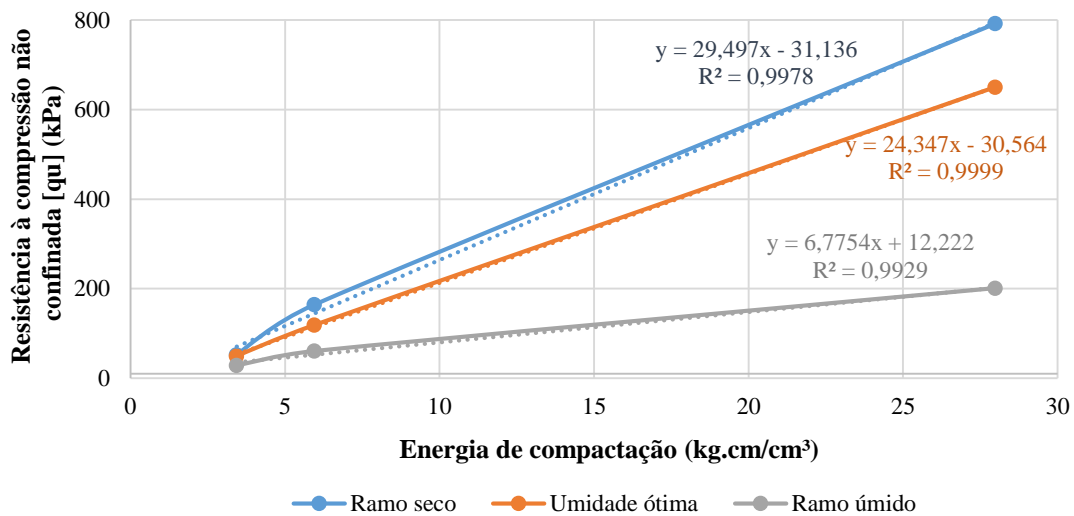
Figura 4.9 - Resistência à compressão simples das amostras de solo ensaiadas.



Quanto à avaliação de cada energia de compactação, nota-se um crescimento da resistência a compressão conforme decréscimo do teor de umidade de moldagem. Em relação aos critérios de aprovação, observa-se que somente as amostras representantes do *proctor* modificado estariam aptas segundo as determinações estabelecidas no item 2.5 desta pesquisa.

Em contrapartida, a Figura 4.10 apresenta a relação entre as energias de compactação e a resistência à compressão não confinada das amostras, demonstrando que esta relação apresenta-se de forma semelhante à uma reta. Nota-se que a inclinação desta reta diminui ao passo que a umidade de moldagem se amplifica. Infere-se portanto que, dentro do processo de acréscimo de resistência à compressão não confinada por meio do aumento da energia de compactação, o crescimento do teor de umidade de moldagem tem função amenizadora no ganho de resistência à compressão simples.

Figura 4.10 - Energia de compactação x Resistência à compressão simples.



4.2.4. ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

O ensaio de retração volumétrica teve por objetivo avaliar a variação de volume das amostras representativas dos pontos nas curvas de compactação escolhidos no item 4.2.1. Em paralelo à esta análise foi verificada também a variação de massa das mesmas amostras. Ambos os parâmetros tiveram um tempo total de ensaio de 15 dias em ambiente laboratorial, quando observadas que as variações, de volume e massa, haviam praticamente se estabilizado. Em relação à retração volumétrica, foi observado que as amostras em média estabilizaram-se no décimo dia de medição. A Tabela 4.6 demonstra as umidades representativas dos ramos seco, úmido e da umidade ótima para os ensaios de retração volumétrica.

Tabela 4.6 - Teor de umidade de moldagem das amostras do ensaio de retração volumétrica.

	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido
<i>Proctor reduzido</i>	27,7%	31,9%	35,0%
<i>Proctor normal</i>	25,2%	29,6%	32,7%
<i>Proctor modificado</i>	19,3%	23,9%	28,6%

a) *Proctor* reduzido

As variações volumétricas relativas às amostras compactadas com *proctor* reduzido demonstraram os maiores valores em módulo, crescendo à medida em que o teor de umidade de moldagem aumentava. A Figura 4.11 apresenta a variação de volume das amostras em relação ao tempo. Os valores das variações máximas no período foram de -4,1% para as amostras no ramo seco, -4,6% para a umidade ótima e -6,1% para o ramo úmido. Em paralelo, na Figura 4.12, são estabelecidos os valores das variações de massa no mesmo intervalo de tempo, constata-se que esta diminuição de massa foi proporcional ao teor de umidade de moldagem, demonstrando-se que as amostras com maiores teores de umidade iniciais apresentaram as maiores variações de massa.

Figura 4.11 - Variação volumétrica para amostras compactadas com energia reduzida.

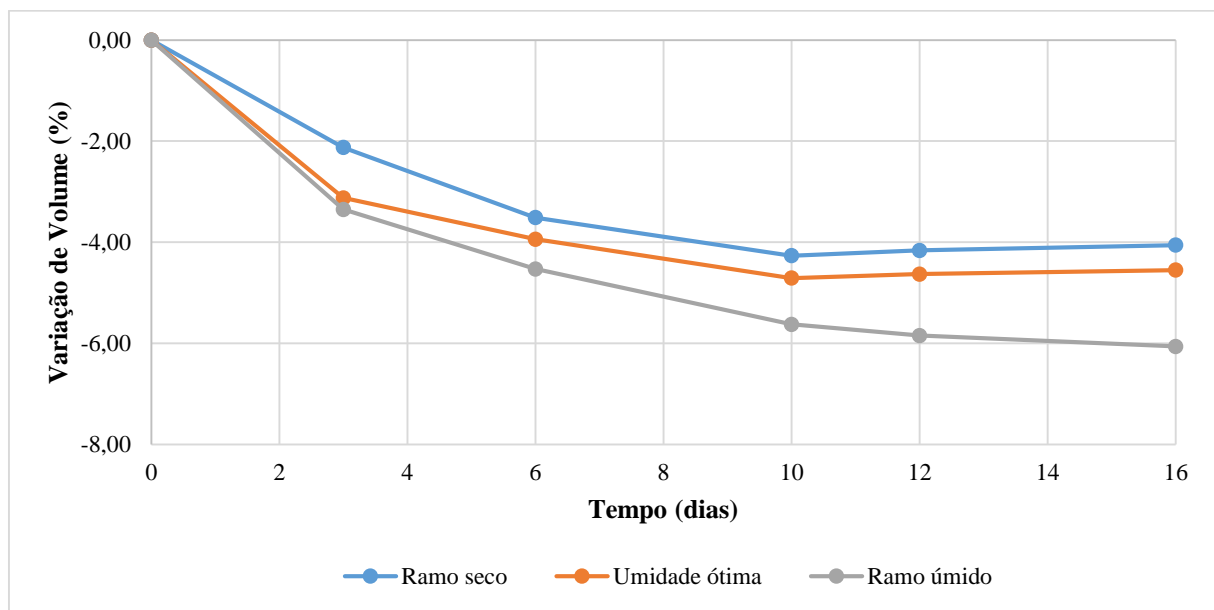
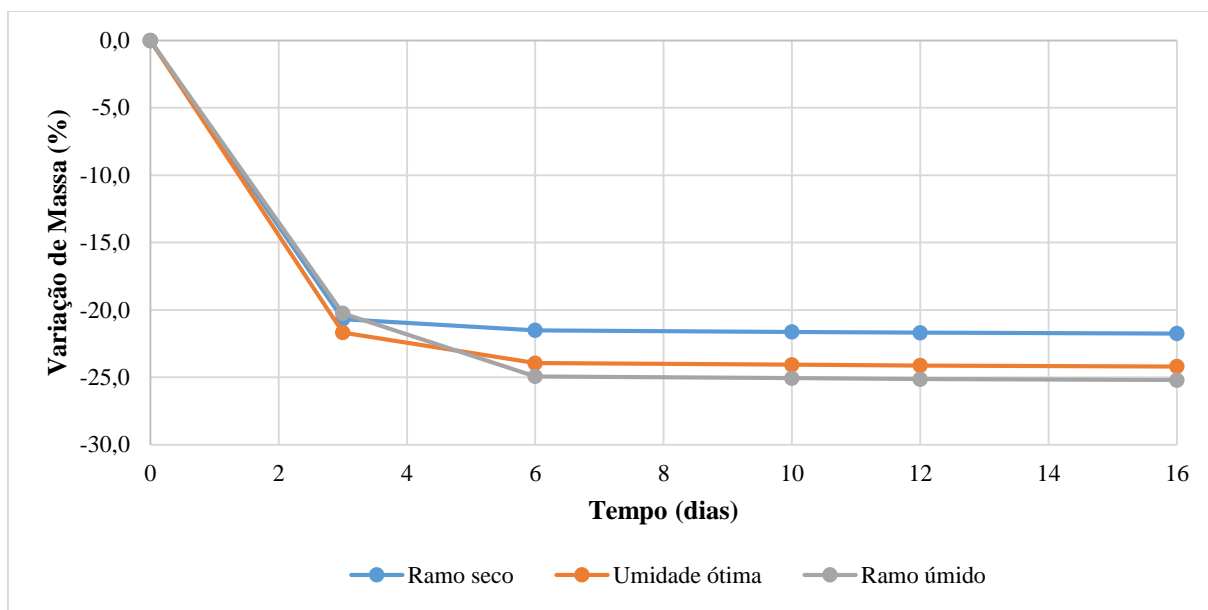


Figura 4.12 - Variação de massa para amostras compactadas com energia reduzida.



b) *Proctor* normal

Para o *proctor* normal, as variações volumétricas são apresentadas na Figura 4.13. Os dados demonstram o mesmo padrão apresentado pelo *proctor* reduzido, mostrando uma variação crescente em relação ao aumento do teor de umidade de moldagem. As variações máximas obtidas no período foram de -3,8% para as amostras no ramo seco, -4,5% para a umidade ótima e -5,1% para o ramo úmido. A Figura 4.14 demonstra a variação de massa no período crescendo à medida que o teor de umidade de moldagem aumenta.

Figura 4.13 - Variação volumétrica para amostras compactadas com energia normal.

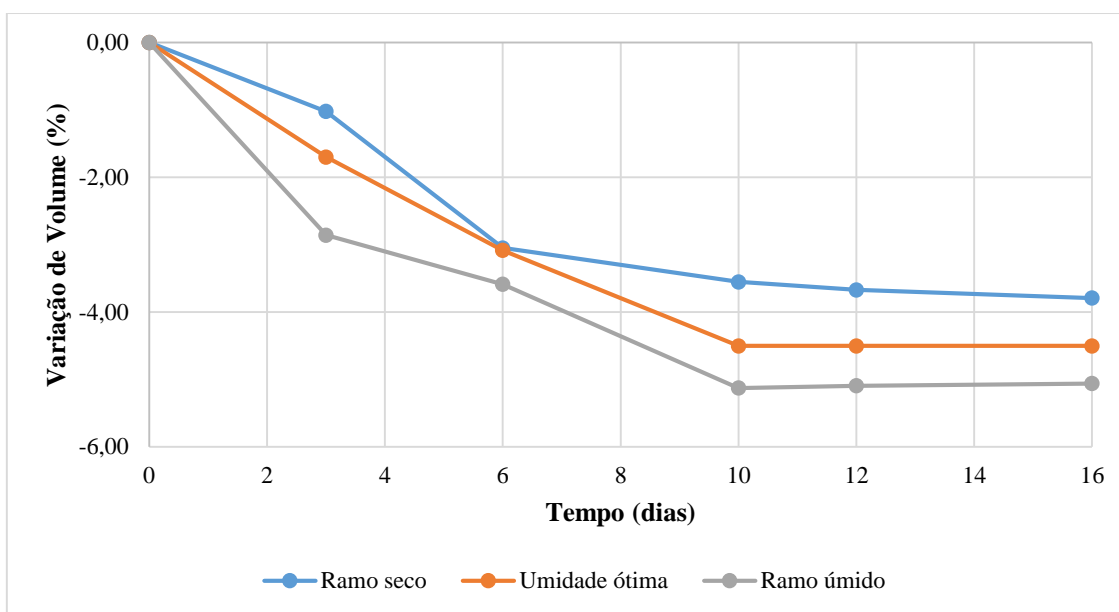
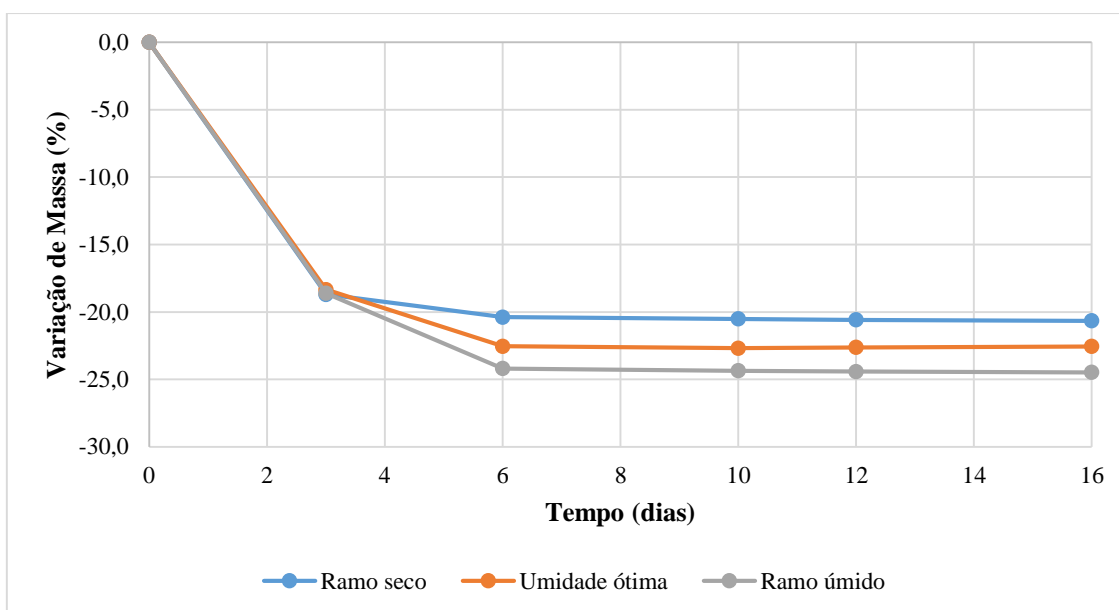


Figura 4.14 - Variação de massa para amostras compactadas com energia normal.



c) Proctor modificado

As amostras referentes ao *proctor* modificado apresentaram as menores variações volumétricas (Figura 4.15). Observa-se o mesmo padrão de variação de volume em relação ao teor de moldagem verificados nos outros *proctors*. As variações máximas obtidas no período foram de -2,4% para as amostras no ramo seco, -3,4% para a umidade

ótima e -3,7% para o ramo úmido. A Figura 4.16 demonstra a variação de massa no período crescendo à medida que o teor de umidade de moldagem aumenta.

Figura 4.15 - Variação volumétrica para amostras compactadas com energia modificada.

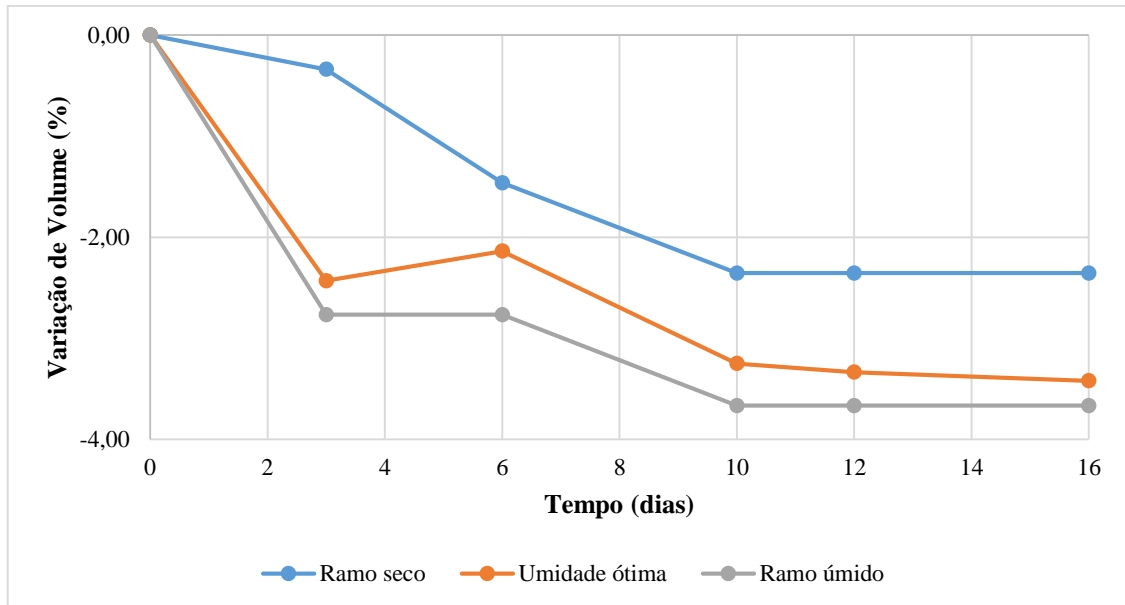
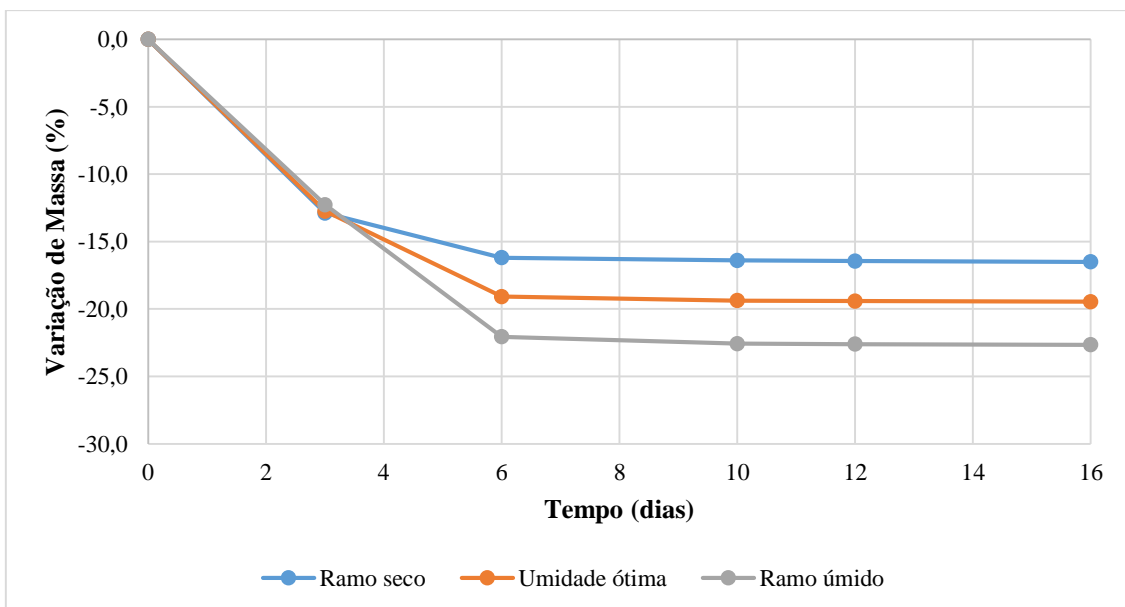


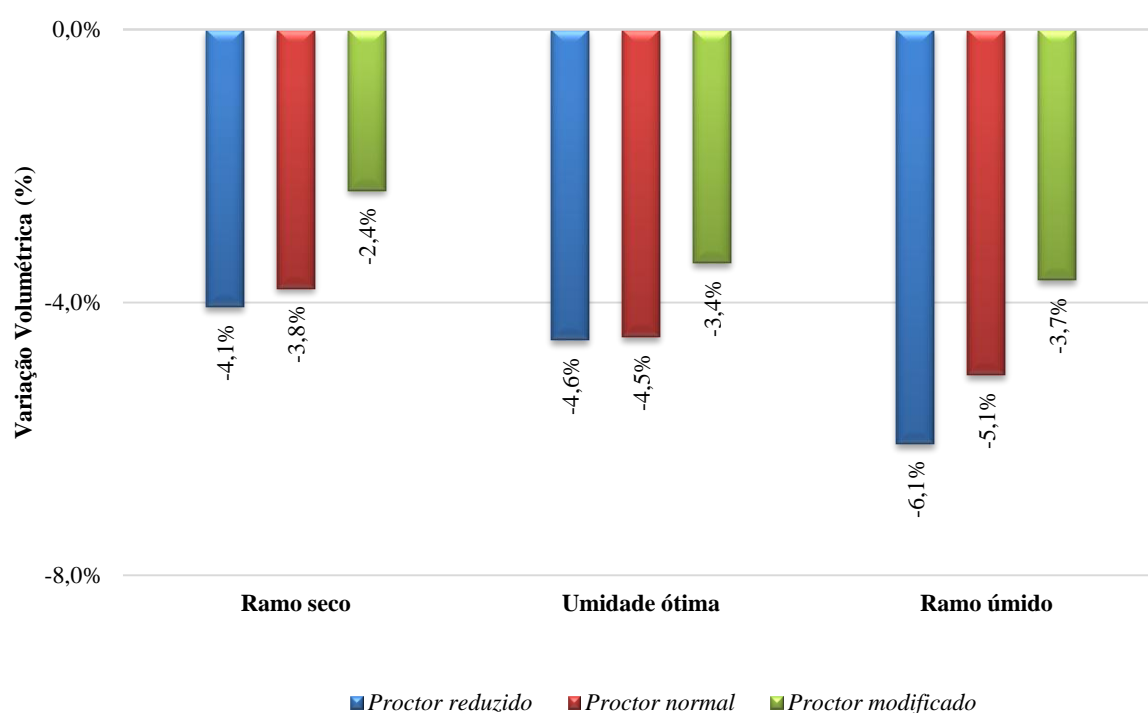
Figura 4.16 - Variação de massa para amostras compactadas com energia modificada.



Os resultados globais do ensaio de retração volumétrica são apresentados na Figura 4.17. Houve aumento da variação de volume, em módulo, a medida que os teores de umidade de moldagem cresciam, ou seja, as menores retrações foram obtidas nas amostras do ramo

seco, seguidas pela umidade ótima e pelo ramo úmido. Em uma análise ramo por ramo percebe-se que a variação de volume amplia-se conforme diminui-se a energia de compactação. Esta constatação é justificada visto que as umidades de moldagem aumentarem, para cada ramo, a medida em que a energia de compactação diminuía, conforme apresentado anteriormente na Tabela 4.3.

Figura 4.17 - Variação volumétrica das amostras de solo ensaiadas.

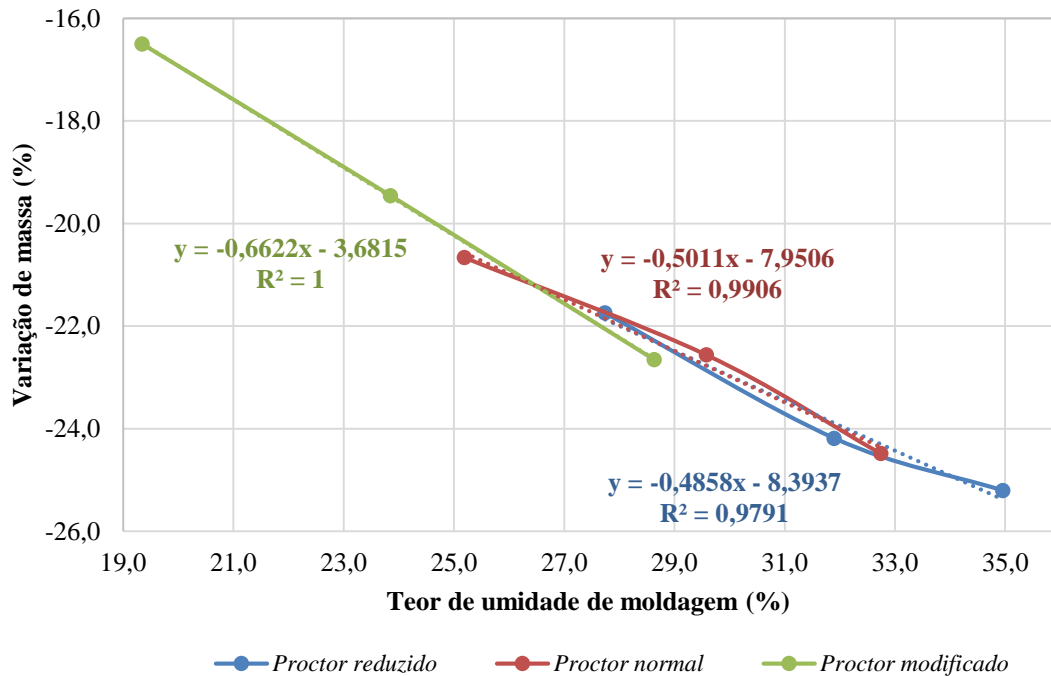


Em relação aos critérios estabelecidos no item 2.5 desta pesquisa, observa-se que no ramo seco, as amostras de *proctors* normal e modificado seriam aprovadas, já na umidade ótima e no ramo úmido, apenas os corpos de prova relativos à energia de compactação modificada apresentam-se dentro dos critérios estabelecidos no item 2.5.

As variações de massa em relação as umidades das energias de compactação são apresentadas na Figura 4.18. Verifica-se que as variações de massa se apresentam de maneira próxima à linear e que os padrões de oscilação das massas em relação às umidades de moldagem apresentam-se quase insensíveis às energias de compactação, ou seja, os teores de umidade de moldagem são parâmetros que possuem uma ordem de

importância muito maior à energia de compactação em relação a variação de massa das amostras.

Figura 4.18 - Variação da massa em relação ao teor de moldagem.



4.3. APLICAÇÃO DO ESTUDO AO MÉTODO DE DANIEL E WU (1993)

A apresentação de resultados que segue tem por objetivo compilar todo o produto do programa experimental, aplicando-o ao estudo de Daniel e Wu (1993) segundo os critérios modificados apresentados no item 2.5 desta pesquisa. A Tabela 4.7 demonstra o resumo das condições de aprovação para os critérios de condutividade hidráulica, resistência à compressão simples e retração volumétrica para as três energias de compactação citadas anteriormente para o solo em estudo.

Tabela 4.7 - Resumo dos resultados dos ensaios da 2ª etapa da pesquisa.

	<i>Proctor</i> reduzido			<i>Proctor</i> normal			<i>Proctor</i> modificado		
	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido	Ramo seco	Umidade ótima	Ramo úmido
Condutividade hidráulica									
Resistência à compressão simples									
Retração volumétrica									



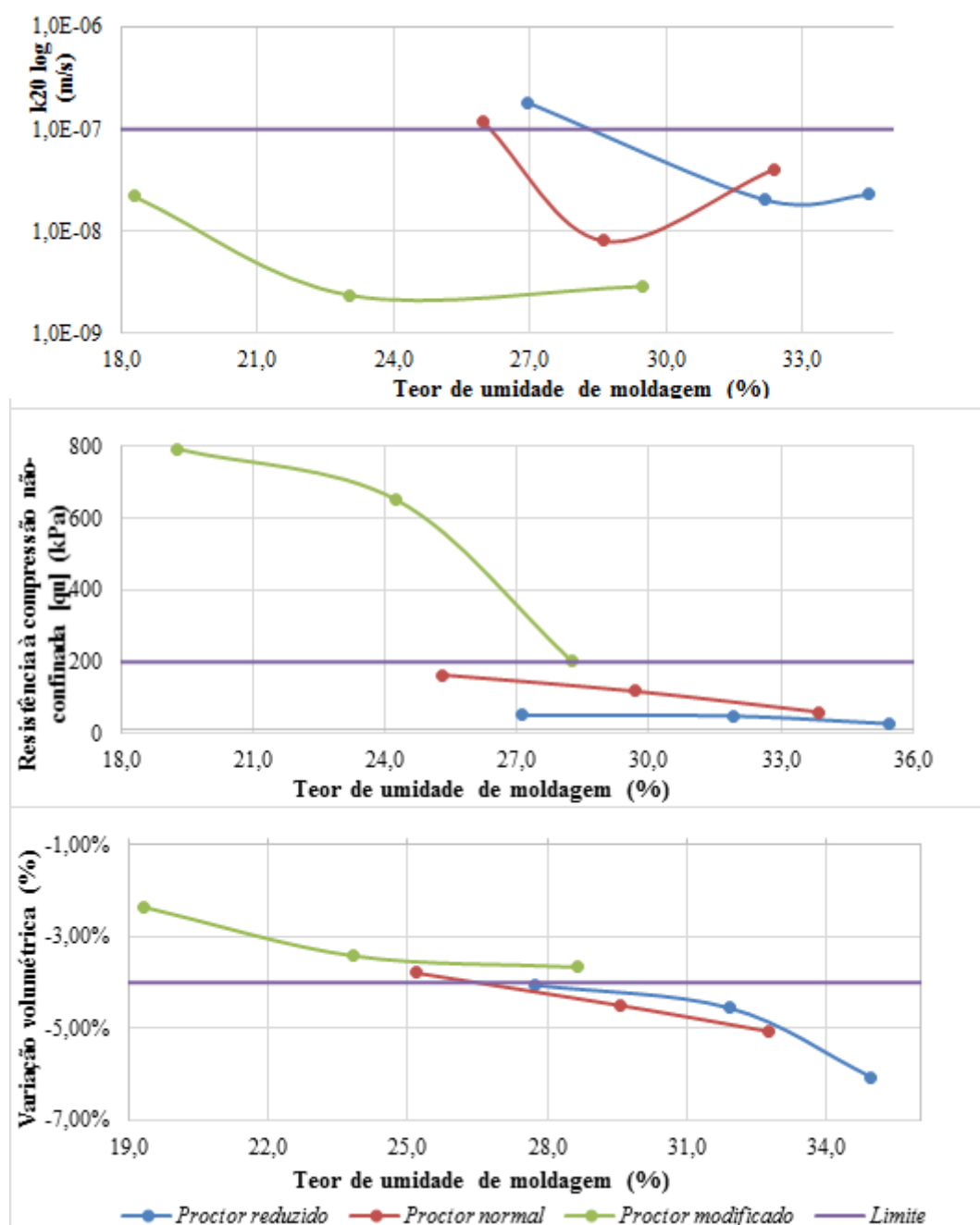
Aprovado no critério



Não aprovado no critério

A partir dos resultados obtidos e considerando o modelo de variação dos critérios em função do teor de umidade de moldagem (Figura 4.19), foi possível determinar por aproximação as umidades aos quais o solo estaria dentro dos critérios de aprovação desta metodologia. Salienta-se que a definição precisa dessas regiões necessita de uma análise mais apurada, que considere mais pontos em cada curva de compactação, a fim de melhorar a exatidão e nitidez destas áreas.

Figura 4.19 - Padrão de variação dos critérios em função do teor de umidade de moldagem.



Baseada nos dados apresentados anteriormente, a Figura 4.20 apresenta as regiões de aceitação de cada critério dentro na curva de compactação. A sobreposição destas áreas determina a zona de aceitação para ambos os fatores analisados.

Observa-se que apenas a curva de compactação referente ao *proctor* modificado atendeu, simultaneamente, às especificações definidas na pesquisa, demonstrando que, para o solo estudado a energia normal de compactação não seria suficiente para atender às necessidades estabelecidas nesta pesquisa para camadas de coberturas de aterros

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

O estudo das características do solo para aplicabilidade em camadas de cobertura foi dividido em duas partes: caracterização do solo e estudo das propriedades hidráulicas e mecânicas do solo. Com base na análise e discussão dos resultados podem ser inferidas as seguintes conclusões:

Quanto aos ensaios de caracterização pode-se resumir o seguinte resultado:

- O solo estudado foi classificado, com auxílio da carta de plasticidade de Casagrande, como silte de alta compressibilidade – MH.

Os resultados dos ensaios de avaliação das propriedades hidráulicas e mecânicas permitiram concluir que:

- A energia de compactação influi na umidade e massa específica seca do solo na curva de compactação. Aumentando-se a energia de compactação desloca-se a curva de compactação para a esquerda e para cima, ou seja, este aumento diminui os teores de umidade de moldagem e aumentam a densidade seca do solo para pontos correspondentes de cada curva.
- Os ensaios de permeabilidade demonstram os menores valores próximos ao ponto ótimo da curva de compactação. Em uma comparação entre ramo seco e úmido, pode-se observar que a permeabilidade no ramo seco apresenta-se na ordem de dez vezes maior que o mesmo parâmetro na umidade ótima, enquanto a permeabilidade do ramo úmido apresenta-se um pouco maior que a permeabilidade da umidade ótima. Esta variação é responsabilidade da estrutura do solo em cada ramo estudado, floculada para o ramo seco e dispersa para o ramo úmido.
- Quanto ao ensaio de resistência à compressão simples, pôde ser observado que a resistência varia diretamente à energia de compactação, observando-se que os maiores valores foram obtidos para as amostras compactadas com energia modificada. Em se tratando da variação da resistência para uma mesma energia, observa-se que as amostras com maiores teores de umidade de moldagem apresentaram as menores resistências à compressão não confinadas.

- O módulo de elasticidade apresentou-se menor a medida que a energia de compactação diminuía. Quanto à variação do módulo em relação à uma mesma energia, notou-se que amostras com maiores teores de umidade na moldagem apresentaram os menores valores do módulo.
- No que se refere ao ensaio de retração volumétrica, notou-se que as amostras com maiores umidades na moldagem apresentaram as maiores retrações para uma mesma energia de compactação. Observou-se que os valores de retração volumétrica cresciam em conjunto à diminuição da energia de compactação, em virtude do aumento do teor de umidade de moldagem para cada ponto correspondente.

Acerca da aplicação da pesquisa na metodologia de Daniel e Wu (1993), inferiu-se que:

- Quanto aos critérios de aprovação estabelecidos nesta pesquisa somente a curva de compactação representante da energia modificada de compactação demonstrou-se apta para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários.

5.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Baseado nos resultados obtidos neste projeto final de graduação, propõe-se as seguintes possibilidades para futuras pesquisas:

- Estudo da adição de argilominerais (podendo ser estudada a incorporação de bentonita ao solo) e esferas de vidro, a fim de aprimorar parâmetros hidráulicos e mecânicos de interesse do solo para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários.
- Aplicação de um solo tipicamente argiloso à metodologia de Daniel e Wu (1993), considerando-se para tanto o mesmo coeficiente de permeabilidade limite para aprovação usado na pesquisa original ($k < 10^{-9}$ m/s).
- Definição de outros critérios de interesse para aprimoramento da zona de aceitação do solo, como por exemplo: resistência ao cisalhamento e adensamento do solo.
- Avaliar, em termos quantitativos, a influência da fissuração pelo processo de secagem na permeabilidade original do solo compactado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004, 71p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997, 12p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770: Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992, 4p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000, 3p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (método de ensaio). Rio de Janeiro, 1986, 8p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984b, 6p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c, 3p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a, 13p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986a, 10p.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama de resíduos sólidos no Brasil- 2014. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_envio.cfm?ano=2014>. Acesso em: set/2015.

AHUALLI, L. A. F.; CARMO, M. V. N. S. Efeitos da Contaminação na Degradação do RCC Utilizado em Obras Geotécnicas. Monografia de Projeto Final [Distrito Federal] 2014. 60 p. Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

ALBRIGHT, W. H., BENSON, C. H., GEE, G. W., *et al.* Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site, J. Geotech Geoenviron. Eng., 132(11), 1393-1403, 2006.

ASSIS, A. P. A. Apostila de Barragens. 2003. Publicação: G. AP- AA006/02. 170 p.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D698-00: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard

effort. In: Annual book of ASTM standards.Vol. 04.08. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Penn, 2000a.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D1557-00: Test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. Philadelphia, 2000b.

BERNADES JR., C.; SABAGG, M.A.F. & FERRARI, A.A.P. Aspectos tecnológicos de projetos de aterros de resíduos sólidos. In: RESID'99, 1999, São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 30 set. 1999. p.51-68

BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. São Carlos: EESC; USP. 1999.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental. Oficina de textos, São Paulo, 2008, 248p.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: set./ 2015.

CAMPOS, H. K. T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2012, 17(2): 171-180p.

CONDER. Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia. Manual de Operação de Aterros Sanitários. Bahia, 2005, 28 p.

COSTA, C. M. C. Avaliação do processo de fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos. Brasília, 2015. 163 p. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2015.

DANIEL D. E.; BENSON, C. H. Water content-density criteria for compacted soil liners. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(12): 1811-1830p.

DANIEL, D. E. Earth en liners for land disposal facilities. Geotechnical practice for waste disposal '87, R. D. Woods, ed., ASCE, New York, N.Y., 1987, 21-39p.

DANIEL, D.E.; WU, Y. K. Compacted clay liners and cover for arid sites. In: Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119 (2): p. 223-237.

GODECKE, M. V.; NAIME, R. H.; FIGUEIREDO, J. A. S. O consumismo e a geração de resíduos sólidos no Brasil. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Cascavel, v.8, n.8, p.1700-1712, set-dez. 2012. Disponível em: <<http://web-resol.org/textos/6380-33840-2-pb-2.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2015.

GOOGLE MAPS. Retirado de: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: novembro de 2015.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Contas Nacionais – PIB per capita – Brasil 2008 a 2014. Disponível em: <<http://brasilemsintese.ibge.gov.br/contas-nacionais/pib-per-capita.html>>. Acesso em: set/ 2015.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. População – População total – 1980 a 2010. Disponível em: <<http://brasilemsintese.ibge.gov.br/populacao/populacao-total-1980-2010.html>>. Acesso em: set./ 2015.

KLEPPE, J. H., OLSON, R. E. "Desiccation cracking of soil barriers. Hydraulics barrier in soil and rock, (ASTM STP 874), A. J. Johnson, R. K. Frobel, N. J. Cavallisand C. B. Pettersson, eds., ASTM, Philadelphia, Pa., 1985, 263-275p.

MARINHO, F. A. M. Cobertura de aterro: Requerimentos, Definições e Visão geral dos sistemas. 2006. 30 p. Notas de Aula.

MENDES, J. A. M.; TOUZE-FOLTZ, N.; PALMEIRA, E.M. Fluxo de líquidos através de barreiras compostas em aterros sanitários: influência das características do GCL. 2015. 14 p. Livro Comemorativo dos Vinte Anos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

MILLER, C. J.; RIFAI, S. "Fiber Reinforcement for Waste Containment Soil Liners" Journal of Environmental Engineering, Vol. 130(8), 2003, 2004.130:891-895.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos>>. Acesso em: nov./ 2015.

MITCHELL, J. K., HOOPER, D.R., CAMPANELLA, R.G. Permeability of compacted clay. In: Journal soil mechanics and foundations div, 1965, 91 (SM4): 41-65p.

OECD (2014). ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT – Municipal waste (indicator). Disponível em: <<https://data.oecd.org/waste/municipal-waste.htm>>. Acesso em: ago. 2015.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

QUISSINI, C. S. Estudo da aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos. 2009. 83p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

RAYHANI, M. H. T.; YANFUL, E. K.; FAKHER, A. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran Canadian geotechnical journal, 44(3), 276-283, 2007.

REIS, F. A. G. V. Curso de Geologia Ambiental: Disposição de Resíduos. 03 mar. 0006, 07 mar. 2001. Disponível em:

<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res02.html> >. Acesso em: ago. 2015. 12 p. Notas de Aula.

SANTOS, J. R.; SILVA, T. J. L. Viabilidade do uso de um Solo Tropical e Fibras PET em Sistemas de Cobertura de Aterros Sanitários. [Distrito Federal] 2015. 76 p. Trabalho de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

SLU. SERVIÇO DE LIMPEZA URBANA. (2015). Relatório dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo dos Resíduos Sólidos do Distrito Federal, 57 p.

US.EPA (2004). Environmental Protection Agency – Technical Guidance For RCRA/CERCLA Final Covers. Washington, DC: EPA. Disponível em <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10074PP.PDF?Dockey=P10074PP.PDF>> Acesso em: jun. 2016.

WORLD BANK. What a waste: solid waste management in Asia. Urban Development Sector Unit; East, Asia and Pacific Region. Washington: 1999.

APÊNDICES



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - PROCTOR REDUZIDO

Amostra: Aterro sanitário Oeste				Local: Samambaia - DF	
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Peso (g)	Soquete	Cilindro
1	12,75	9,95	2373	Pequeno	Pequeno
Energia de Compactação: <i>Proctor</i> Reduzido			Golpes por camada: 15		
Ensaio realizado sem reuso de material					

Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso do Cilindro (g)	Cilindro + Solo (g)
-	12,75	9,95	990,89	2373	4000
-	12,75	9,95	990,89	2373	4151
-	12,75	9,95	990,89	2373	4209
-	12,75	9,95	990,89	2373	4152
-	12,75	9,95	990,89	2373	4156
-	12,74	9,96	992,11	2355	4009
-	12,74	9,96	992,11	2355	4189

Solo Compactado (g)	Capsula N°	Solo Umido + Capsula (g)	Solo Seco + Capsula (g)	Capsula (g)	w(%)	w média (%)	γ _d (g/cm³)
1627	108	123,58	104,32	31,35	26,4	26,4	1,30
	P01	114,52	96,00	26,14	26,5		
	R35	110,23	92,59	25,30	26,2		
1778	I09	117,00	96,07	26,40	30,0	30,1	1,38
	T3	115,20	94,83	27,20	30,1		
	I6	115,90	97,54	36,40	30,0		
1836	P01	116,10	93,98	26,15	32,6	32,2	1,40
	I31	123,40	100,85	30,50	32,1		
	A01	109,40	89,76	28,10	31,9		
1779	106	159,60	140,20	86,80	36,3	36,5	1,32
	113	127,30	106,50	49,80	36,7		
	122	174,90	152,70	91,80	36,5		
1783	101	179,60	152,52	87,20	41,5	41,2	1,27
	109	190,80	161,89	91,70	41,2		

	121	168,90	143,71	82,10	40,9		
1654	T3	121,35	101,23	26,7	27,0	27,0	1,31
	I61	93,14	79,21	27,45	26,9		
	I31	132,22	110,47	29,93	27,0		
1834	R35	105,2	84,61	24,84	34,4	34,5	1,37
	P05	128,26	101,97	25,9	34,6		
	1	131,16	104,43	26,79	34,4		

Curva de Compactação							
w (%)	26,4	27,0	30,1	32,2	34,5	36,5	41,2
γ_d (kN/m ³)	1,30	1,31	1,38	1,40	1,37	1,32	1,27

W ótimo	31,5	%
γ_d máx.	1,41	g/cm³



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - *PROCTOR NORMAL*

Amostra: Aterro Sanitário oeste				Local: Samambaia - DF	
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Peso (g)	Soquete	Cilindro
1 e 2	12,75	10,00	2354	Pequeno	Pequeno
Energia de Compactação: Proctor Normal			Golpes por camada: 26		
Ensaio realizado sem reuso de material					

Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm ³)	Peso do Cilindro (g)	Cilindro + Solo (g)
-	12,75	10	1000,88	2354	3954
-	12,75	10	1000,88	2354	4084
-	12,75	10	1000,88	2354	4184
-	12,75	10	1000,88	2354	4224
-	12,75	9,95	990,89	2357	4240
-	12,75	10	1000,88	2354	4214
-	12,75	10	1000,88	2357	4197
-	12,75	10	1000,88	2357	4155
-	12,74	9,96	992,11	2355	4180
-	12,74	9,96	992,11	2355	4185
-	12,74	9,96	992,11	2357	4124

Solo Compactado (g)	Capsula N°	Solo Umido + Capsula (g)	Solo Seco + Capsula (g)	Capsula (g)	w(%)	w média (%)	γ_d (g/cm³)
1600	108	137,21	117,87	31,35	22,4	22,3	1,31
	P01	95,24	82,51	26,14	22,6		
	R35	101,08	87,38	25,30	22,1		
1730	1	107,91	91,84	26,02	24,4	24,8	1,38
	I17	102,08	86,92	28,09	25,8		
	A01	93,13	80,22	27,09	24,3		
1830	I09	112,66	94,41	26,42	26,8	26,7	1,44
	R29	114,23	95,84	26,99	26,7		
	R34	138,29	115,42	29,63	26,7		
1870	R23	106,47	88,82	25,57	27,9	28,0	1,46
	I15	96,56	80,71	23,98	27,9		
	I61	110,64	92,54	27,96	28,0		
1883	108	109,70	91,52	31,33	30,2	30,2	1,46
	1	112,00	92,38	27,32	30,2		
	I61	127,70	104,62	28,01	30,1		
1860	P05	103,94	85,69	26,44	30,8	30,9	1,42
	P06	116,51	94,80	24,49	30,9		
	R31	114,00	93,09	25,49	30,9		
1840	A14	178,81	139,56	28,06	35,2	35,3	1,36
	T3	181,18	141,25	27,22	35,0		
	R35	154,86	120,86	25,30	35,6		
1798	B2R23	161,11	123,76	25,57	38,0	38,6	1,30
	I121	185,37	140,85	26,69	39,0		
	I31	209,04	159,06	30,47	38,9		
1825	P06	131,40	107,45	24,03	28,7	28,6	1,43
	108	123,74	102,99	30,71	28,7		
	R31	99,97	83,36	25,03	28,5		
1830	R29	109,21	88,94	26,50	32,5	32,4	1,39
	A14	108,78	88,94	27,55	32,3		
	I15	109,90	88,78	23,56	32,4		
1767	R29	116,60	98,27	27,20	25,8	26,0	1,41
	A14	100,75	85,22	25,60	26,0		
	I15	116,50	97,34	24,00	26,1		

Curva de Compactação							
w (%)	22,3	24,8	26,7	28,0	30,2	35,3	38,6
γ_d (kN/m³)	1,31	1,38	1,44	1,46	1,46	1,36	1,30

W ótimo	29,0	%
γ_d máx.	1,47	g/cm³



ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

- PROCTOR MODIFICADO

Amostra: Aterro Sanitário Oeste				Local: Samambaia-DF	
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Peso (g)	Soquete	Cilindro
1	12,75	9,95	2357	Grande	Pequeno
Energia de Compactação: <i>Proctor</i> Modificado			Golpes por camada: 27		
Ensaio realizado sem reuso de material					

Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm³)	Peso do Cilindro (g)	Cilindro + Solo (g)
-	12,75	9,95	990,89	2357	3963
-	12,75	9,95	990,89	2357	4043
-	12,75	9,95	990,89	2357	4300
-	12,75	9,95	990,89	2357	4301
-	12,75	9,95	990,89	2357	4315
-	12,74	9,96	992,11	2355	4186
-	12,74	9,96	992,11	2357	4283,1

Solo Compactado (g)	Capsula N°	Solo Umido + Capsula (g)	Solo Seco + Capsula (g)	Capsula (g)	w(%)	w média (%)	γ _d (g/cm³)
1606	P29	135,10	120,03	27,00	16,2	16,5	1,39
	P06	111,60	99,54	24,50	16,1		
	R35	141,30	125,07	30,50	17,2		
1686	A14	117,20	103,40	28,14	18,3	18,2	1,44
	R31	111,40	98,21	25,57	18,2		
	R34	129,50	114,14	29,70	18,2		
1943	R34	98,95	85,95	29,65	23,1	23,0	1,59
	A01	114,88	98,60	28,09	23,1		
	R29	126,09	107,61	27,00	22,9		
1944	I09	122,59	100,98	26,41	29,0	28,8	1,52
	I08	123,56	102,93	31,30	28,8		
	I15	141,42	115,21	23,98	28,7		
1958	P06	138,38	115,05	24,48	25,8	26,5	1,56
	I61	135,06	113,11	27,99	25,8		
	P01	124,31	103,95	26,15	26,2		
1831	P01	118,02	103,94	25,65	18,0	18,3	1,56
	R34	122,47	107,68	29,08	18,8		
	A01	124,23	108,97	24,59	18,1		

1926	P06	125,20	102,30	24,50	29,4	29,5	1,50
	I61	111,00	92,42	28,00	28,8		
	R31	95,90	79,55	25,50	30,2		

Curva de Compactação						
w (%)	16,5	18,2	23,0	26,5	28,8	29,5
γ_d (kN/m ³)	1,39	1,44	1,59	1,56	1,52	1,50

W ótimo	23,5 %
γ_d máx.	1,60 g/cm³

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - *PROCTOR* REDUZIDO



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Reduzido	Zona de umidade:	Ramo seco

Umidade Inicial			
Capsula N°	T3	I61	I31
tara (g)	26,7	27,45	29,93
tara + SH (g)	121,35	93,14	132,22
tara + SS (g)	101,23	79,21	110,47
Umidade (%)	27,0	26,9	27,0
		w (%) :	27,0

Características do Corpo de Prova				
Molde N° =	1	Altura (cm) =	12,74	Área (cm ²) = 77,91
Volume (cm ³) =	992,61	Massa Molde(g) =	2355	Massa Molde+Solo (g) = 4009
Massa Solo (g) =	1654	γ_d (g/cm ³) =	1,31	Massa Específica dos Solos (g/cm ³) = 2,81
Grau de Compactação (%) =	92,91%	Índice de Vazios =	1,14	Grau de Saturação (%) = 66,41

Seção da bureta (cm ²) =		0,3167	Temp. água(°C) =	26,5
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)		
	34	71,6	70,6	
	35	71,6	70,6	
	36	71,6	70,6	
	35	71,6	70,6	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Reduzido	Zona de umidade:	Umidade ótima

Umidade Inicial			
Capsula N°	P01	I31	A01
tara (g)	26,15	30,5	28,1
tara + SH (g)	116,1	123,4	109,4
tara + SS (g)	93,98	100,85	89,76
Umidade (%)	32,6	32,1	31,9
		w (%) :	32,2

Características do Corpo de Prova			
Molde N° =	Altura (cm) =	12,75	Área (cm ²) = 77,76
Volume (cm ³) =	991,40	Massa Molde+Solo (g) =	4209
Massa Molde(g) =	2373	Massa Solo (g) =	1836
	ρ_d (g/cm ³) =	1,40	Massa Específica dos Solos (g/cm ³) = 2,81
Grau de Compactação (%) =	99,29%	Índice de Vazios =	1,01
		Grau de Saturação (%) =	89,91

Seção da bureta (cm ²) =	0,8075	Temp.água(°C) =	21
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)	
	330	195,3	194,3
	312	195,3	194,3
	334	195,3	194,3
	324	195,3	194,3



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Reduzido	Zona de umidade:	Ramo úmido

Umidade Inicial			
Capsula N°	R35	P05	1
tara (g)	24,84	25,9	26,79
tara + SH (g)	105,2	128,26	131,16
tara + SS (g)	84,61	101,97	104,43
Umidade (%)	34,4	34,6	34,4
w (%):			34,5

Características do Corpo de Prova				
Molde N° =	1	Altura (cm) =	12,74	Área (cm ²) = 77,91
Volume (cm ³) =	992,61	Massa Molde(g) =	2355	Massa Molde+Solo (g) = 4189
Massa Solo (g) =	1834	g _d (g/cm ³) =	1,37	Massa Específica dos Solos (g/cm ³) = 2,81
Grau de Compactação (%) =	97,16%	Índice de Vazios =	1,05	Grau de Saturação (%) = 92,69

Seção da bureta (cm ²) =	0,8075	Temp.água(°C) =	21
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)	
	281	195,3	194,3
	290	195,3	194,3
	295	195,3	194,3
	296	195,3	194,3

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - *PROCTOR* NORMAL



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Normal	Zona de umidade:	Ramo seco

Umidade Inicial			
Capsula N°	R29	A14	I15
tara (g)	27,20	25,60	24,00
tara + SH (g)	116,60	100,75	116,50
tara + SS (g)	98,27	85,22	97,34
Umidade (%)	25,8	26,0	26,1
		w (%) :	26,0

Características do Corpo de Prova				
Molde N° =	Altura (cm) =	12,74	Área (cm ²) =	77,87
Volume (cm ³)	992,11			
Massa Molde(g) =	2357	Massa Molde+Solo (g) =	4124	Massa Solo (g) =
		1767		
	g _d (g/cm ³) =	1,41	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³) =	2,81
Grau de Compactação (%) =	95,92%	Índice de Vazios =	0,99	Grau de Saturação (%) =
				73,93

Seção da bureta (cm ²)=	0,8975	Temp.água(°C) =	23
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)	
	220	114	112
	208	114	112
	205	114	112
	217	114	112



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Normal	Zona de umidade:	Umidade ótima

Umidade Inicial			
Capsula N°	P06	108	R31
tara (g)	24,03	30,71	25,03
tara + SH (g)	131,40	123,74	99,97
tara + SS (g)	107,45	102,99	83,36
Umidade (%)	28,7	28,7	28,5
		w (%) :	28,6

Características do Corpo de Prova				
Molde N° =	Altura (cm) =	12,74	Área (cm ²) =	77,87
Volume (cm ³) =	992,11			
Massa Molde(g) =	2355	Massa Molde+Solo (g) =	4180	Massa Solo (g) =
				1825
		g _d (g/cm ³) =	1,43	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³) =
				2,81
Grau de Compactação (%) =	97,28%	Índice de Vazios =	0,96	Grau de Saturação (%) =
				83,38

Seção da bureta (cm ²)=	0,3167	Temp.água(°C) =	26
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)	
	452	121,6	120,6
	455	121,6	120,6
	467	121,6	120,6
	473	121,6	120,6



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Normal	Zona de umidade:	Ramo úmido

Umidade Inicial			
Capsula N°	R29	A 14	I15
tara (g)	26,5	27,55	23,56
tara + SH (g)	109,21	108,78	109,9
tara + SS (g)	88,94	88,94	88,78
Umidade (%)	32,5	32,3	32,4
w (%):			32,4

Características do Corpo de Prova				
Molde N° =	Altura (cm) =	12,74	Área (cm ²) =	77,91
Volume (cm ³) =	992,61			
Massa Molde(g) =	2355	Massa Molde+Solo (g) =	4185	Massa Solo (g) =
		1830		
	g _d (g/cm ³) =	1,39	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³) =	2,81
Grau de Compactação (%) =	94,56%	Índice de Vazios =	1,02	Grau de Saturação (%) =
				89,42

Seção da bureta (cm ²)=	0,8075	Temp.água(°C) =	24,2
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)	
	288	114	113
	293	114	113
	285	114	113
	290	114	113

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - *PROCTOR* MODIFICADO



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Modificado	Zona de umidade:	Ramo seco

Umidade Inicial			
Capsula N°	P01	R34	A01
tara (g)	25,65	29,08	24,59
tara + SH (g)	118,02	122,47	124,23
tara + SS (g)	103,94	107,68	108,97
Umidade (%)	18,0	18,8	18,1
		w(%) :	18,3

Características do Corpo de Prova				
Molde N° =	Altura (cm) =	12	Área (cm ²) =	77,91
Volume (cm ³) =	934,96			
Massa Molde(g) =	2357	Massa Molde+Solo (g) =	4043	Massa Solo (g) =
				1686
		g _d (g/cm ³) =	1,44	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³) =
				2,81
Grau de Compactação (%) =	90,00%	Índice de Vazios =	0,95	Grau de Saturação (%) =
				54,07

Seção da bureta (cm ²)=	0,8075	Temp.água(°C) =	24,2
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)	
	450	114	113
	453	114	113
	445	114	113
	458	114	113



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Modificado	Zona de umidade:	Umidade ótima

Umidade Inicial			
Capsula N°	R34	A01	R29
tara (g)	29,65	28,09	27
tara + SH (g)	98,95	114,88	126,09
tara + SS (g)	85,95	98,6	107,61
Umidade (%)	23,1	23,1	22,9
		w (%):	23,0

Características do Corpo de Prova				
Molde N° =	Altura (cm) =	12,75	Área (cm²) =	77,76
Volume (cm³) =	991,40			
Massa Molde(g) =	2357	Massa Molde+Solo (g) =	4300	Massa Solo (g) =
		g _d (g/cm³) =	1,59	Massa Específica dos Sólidos (g/cm³) =
				2,81
Grau de Compactação (%) =	99,38%	Índice de Vazios =	0,76	Grau de Saturação (%) =
				84,72

Seção da bureta (cm²)=	0,2367	Temp.água(°C) =	22,5
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)	
	1005	157	156
	996	157	156
	946	157	156
	990	157	156



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA VARIÁVEL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Data:	14/04/2016
Energia de compactação:	Proctor Modificado	Zona de umidade:	Ramo úmido

Umidade Inicial			
Capsula N°	P06	I61	R31
tara (g)	24,5	28	25,5
tara + SH (g)	125,2	111	95,9
tara + SS (g)	102,3	92,42	79,55
Umidade (%)	29,4	28,8	30,2
w (%):			29,5

Características do Corpo de Prova				
Molde N° =	Altura (cm) =	12,74	Área (cm ²) =	77,91
Volume (cm ³) =	992,61	Massa Molde(g) =	2357	Massa Molde+Solo (g) =
4283	Massa Solo (g) =	1926	g _d (g/cm ³) =	1,50
Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³) =	2,81	Grau de Compactação (%) =	93,75%	Índice de Vazios =
0,88	Grau de Saturação (%) =	94,71		

Seção da bureta (cm ²) =	0,8075	Temp. água (°C) =	21
Hora	Intervalo de tempo (s)	Nível da bureta (cm)	
	1140	195,3	194,8
	1124	195,3	194,8
	1154	195,3	194,8
	1145	195,3	194,8



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES - PROCTOR

REDUZIDO

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	I-61	A-01	T3
Capsula (g)	27,97	28,10	27,19
Capsula + Solo Umido (g)	93,88	100,63	76,02
Capsula + Solo Seco (g)	79,79	85,09	65,60
Umidade (%)	27,2	27,3	27,1
		w (%) = 27,2	

Dados gerais			
Anel:	Número	prensa	
	Constante	1,9	
Prensa:	CBR/MARSHALL		
Energia:	REDUZIDA		
Veloc. (mm/min)		1,27	

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	5,03	Peso (g)	322,01
Altura (cm)	10,19	Ai - Área Inicial (cm²)	19,86
		Volume (cm³)	202,24

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q - Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001986	0	0,00	
0,06	0,4	0,059	0,001987	0,76	3,75	
0,12	0,82	0,118	0,001988	1,558	7,69	
0,21	1,26	0,206	0,001990	2,394	11,80	
0,31	2,04	0,304	0,001992	3,876	19,09	
0,42	3,07	0,412	0,001994	5,833	28,69	
0,54	4,26	0,530	0,001996	8,094	39,76	
0,64	5,12	0,628	0,001998	9,728	47,74	
0,76	5,6	0,746	0,002000	10,64	52,16	
0,87	5,62	0,854	0,002003	10,678	52,29	
0,98	5,42	0,962	0,002005	10,298	50,37	
1,08	5,18	1,060	0,002007	9,842	48,09	
1,19	4,93	1,168	0,002009	9,367	45,72	
1,30	4,68	1,276	0,002011	8,892	43,36	
1,40	4,42	1,374	0,002013	8,398	40,91	
1,52	4,15	1,492	0,002016	7,885	38,36	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES (NBR 12770)

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	T6	P06	R35
Capsula (g)	36,33	24,48	25,30
Capsula + Solo Umido (g)	93,07	104,59	82,49
Capsula + Solo Seco (g)	79,39	85,22	68,65
Umidade (%)	31,8	31,9	31,9
		w (%) =	31,9

Dados gerais			
Anel:	Número	prensa	
	Constante	1,9	
Prensa:	CBR/MARSHALL		
Energia:	REDUZIDA		
Veloc. (mm/min)		1,27	

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	5,04	Peso (g)	358,10
Altura (cm)	10,25	Ai - Área Inicial (cm²)	19,97
		Volume (cm³)	204,63

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q - Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001986	0	0,000	
0,11	0,36	0,108	0,001988	0,684	3,375	
0,19	0,7	0,187	0,001989	1,33	6,557	
0,36	1,18	0,353	0,001993	2,242	11,034	
0,47	1,68	0,461	0,001995	3,192	15,693	
0,58	2,16	0,569	0,001997	4,104	20,154	
0,67	2,78	0,658	0,001999	5,282	25,916	
0,78	3,52	0,766	0,002001	6,688	32,779	
0,89	4,14	0,874	0,002003	7,866	38,511	
0,99	4,69	0,972	0,002005	8,911	43,584	
1,10	5,02	1,080	0,002007	9,538	46,600	
1,19	5,24	1,168	0,002009	9,956	48,598	
1,30	5,31	1,276	0,002011	10,089	49,194	
1,40	5,28	1,374	0,002013	10,032	48,867	
1,52	5,17	1,492	0,002016	9,823	47,792	
1,63	5,03	1,600	0,002018	9,557	46,447	
1,74	4,87	1,708	0,002020	9,253	44,920	
1,83	4,7	1,797	0,002022	8,93	43,313	
1,93	4,51	1,895	0,002024	8,569	41,520	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES (NBR 12770)

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	I15	1	R23
Capsula (g)	24,00	27,32	25,60
Capsula + Solo Umido (g)	90,84	91,52	82,07
Capsula + Solo Seco (g)	72,59	74,93	67,29
Umidade (%)	37,6	34,8	35,5
		w (%) =	36,0

Dados gerais			
Anel:	Número	prensa	
	Constante	1,9	
Prensa:	CBR/MARSHALL		
Energia:	REDUZIDA		
Veloc. (mm/min)			1,27

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	5,01	Peso (g)	Ai - Área Inicial (cm²) 19,71
Altura (cm)	10,17	349,28	Volume (cm³) 200,38

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q - Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001986	0	0,000	
0,10	0,2	0,098	0,001987	0,38	1,875	
0,20	0,42	0,196	0,001989	0,798	3,934	
0,30	0,67	0,295	0,001991	1,273	6,269	
0,34	0,87	0,334	0,001992	1,653	8,137	
0,46	1,21	0,452	0,001995	2,299	11,304	
0,55	1,51	0,540	0,001996	2,869	14,094	
0,65	1,81	0,638	0,001998	3,439	16,877	
0,76	2,11	0,746	0,002000	4,009	19,653	
0,85	2,37	0,835	0,002002	4,503	22,055	
0,97	2,62	0,952	0,002005	4,978	24,352	
1,07	2,8	1,050	0,002007	5,32	26,000	
1,18	2,93	1,158	0,002009	5,567	27,177	
1,28	3	1,257	0,002011	5,7	27,799	
1,38	3,04	1,355	0,002013	5,776	28,141	
1,49	3,05	1,463	0,002015	5,795	28,203	
1,59	3,02	1,561	0,002017	5,738	27,898	
1,69	2,99	1,659	0,002019	5,681	27,593	
1,80	2,96	1,767	0,002021	5,624	27,286	
1,89	2,88	1,856	0,002023	5,472	26,525	
2,00	2,81	1,964	0,002025	5,339	25,852	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES - PROCTOR

NORMAL

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	1	2	3
Capsula (g)	31,02	28,64	28,04
Capsula + Solo Umido (g)	108,37	92,70	81,39
Capsula + Solo Seco (g)	92,73	79,74	70,62
Umidade (%)	25,3	25,4	25,3
w (%) =			25,3

Dados gerais		
Anel:	Número	prensa
	Constante	1,9
Prensa:	CBR/MARSHALL	
Energia:	NORMAL	
Veloc. (mm/min)		1,27

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	4,99	Peso (g)	328,61
Altura (cm)	9,99	Ai - Área Inicial (cm²)	19,57
		Volume (cm³)	195,61

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q - Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001957	0	0,000	
0,11	1,53	0,110	0,001959	2,907	14,550	
0,20	2,38	0,200	0,001961	4,522	22,612	
0,30	3,99	0,300	0,001963	7,581	37,871	
0,39	5,66	0,390	0,001965	10,754	53,673	
0,49	7,72	0,490	0,001967	14,668	73,134	
0,58	9,69	0,580	0,001969	18,411	91,713	
0,69	11,75	0,690	0,001971	22,325	111,087	
0,78	13,3	0,780	0,001973	25,27	125,627	
0,90	14,93	0,901	0,001975	28,367	140,853	
1,00	16,12	1,001	0,001977	30,628	151,926	
1,10	17,04	1,101	0,001979	32,376	160,435	
1,21	17,45	1,211	0,001981	33,155	164,112	
1,32	17,35	1,321	0,001983	32,965	162,990	
1,43	16,69	1,431	0,001986	31,711	156,615	
1,54	15,83	1,541	0,001988	30,077	148,379	
1,64	14,88	1,641	0,001990	28,272	139,333	
1,74	13,9	1,741	0,001992	26,41	130,024	
1,85	12,78	1,851	0,001994	24,282	119,413	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES (NBR 12770)

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	P01	I121	113
Capsula (g)	26,14	26,72	49,70
Capsula + Solo Umido (g)	96,83	113,31	123,41
Capsula + Solo Seco (g)	80,60	93,50	106,53
Umidade (%)	29,8	29,7	29,7
		w (%) = 29,7	

Dados gerais		
Anel:	Número	prensa
	Constante	1,9
Prensa:	CBR/MARSHALL	
Energia:	NORMAL	
Veloc. (mm/min)		1,27

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	4,98	Peso (g)	366,25
Altura (cm)	10,38	Ai - Área Inicial (cm²)	19,49
		Volume (cm³)	202,29

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q - Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001957	0	0,000	
0,12	1,51	0,120	0,001960	2,869	14,358	
0,23	2,15	0,230	0,001962	4,085	20,421	
0,33	2,86	0,330	0,001964	5,434	27,137	
0,42	3,67	0,420	0,001965	6,973	34,791	
0,51	4,65	0,510	0,001967	8,835	44,042	
0,62	5,88	0,620	0,001969	11,172	55,630	
0,73	7,32	0,730	0,001972	13,908	69,177	
0,83	8,96	0,830	0,001974	17,024	84,590	
0,94	10,5	0,941	0,001976	19,95	99,019	
1,05	11,7	1,051	0,001978	22,23	110,213	
1,14	12,31	1,141	0,001980	23,389	115,854	
1,25	12,6	1,251	0,001982	23,94	118,451	
1,36	12,59	1,361	0,001984	23,921	118,225	
1,46	12,34	1,461	0,001986	23,446	115,760	
1,58	11,94	1,581	0,001989	22,686	111,871	
1,69	11,44	1,691	0,001991	21,736	107,067	
1,79	10,94	1,791	0,001993	20,786	102,283	
1,91	10,25	1,911	0,001995	19,475	95,715	
2,01	9,54	2,011	0,001997	18,126	88,994	
2,12	8,56	2,121	0,002000	16,264	79,762	
2,22	7,89	2,221	0,002002	14,991	73,444	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES (NBR 12770)

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	I05	G5-2	I09
Capsula (g)	29,03	84,92	26,42
Capsula + Solo Umido (g)	94,40	154,09	90,02
Capsula + Solo Seco (g)	78,02	136,75	73,93
Umidade (%)	33,4	33,5	33,9
		w (%) = 33,6	

Dados gerais		
Anel:	Número	prensa
	Constante	1,9
Prensa:	CBR/MARSHALL	
Energia:	NORMAL	
Veloc. (mm/min)		1,27

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	4,98	Peso (g)	360,92
Altura (cm)	10,31	Ai - Área Inicial (cm²)	19,49
		Volume (cm³)	200,94

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q - Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001957	0	0,000	
0,02	0,26	0,020	0,001958	0,494	2,475	
0,09	1,09	0,090	0,001959	2,071	10,367	
0,19	1,56	0,190	0,001961	2,964	14,823	
0,29	2,23	0,290	0,001963	4,237	21,168	
0,36	2,78	0,360	0,001964	5,282	26,370	
0,47	3,84	0,470	0,001966	7,296	36,385	
0,61	4,98	0,610	0,001969	9,462	47,120	
0,71	5,29	0,710	0,001971	10,051	50,003	
0,81	5,84	0,810	0,001973	11,096	55,146	
0,93	6,2	0,931	0,001976	11,78	58,475	
1,03	6,37	1,031	0,001978	12,103	60,017	
1,13	6,44	1,131	0,001980	12,236	60,615	
1,24	6,44	1,241	0,001982	12,236	60,548	
1,34	6,38	1,341	0,001984	12,122	59,923	
1,44	6,27	1,441	0,001986	11,913	58,830	
1,54	6,15	1,541	0,001988	11,685	57,646	
1,64	6	1,641	0,001990	11,4	56,182	
1,76	5,8	1,761	0,001992	11,02	54,243	
1,86	5,6	1,861	0,001994	10,64	52,320	
1,96	5,4	1,961	0,001996	10,26	50,400	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES -

PROCTOR MODIFICADO

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	P01	2	3
Capsula (g)	26,16	28,65	28,06
Capsula + Solo Umido (g)	96,16	86,97	93,54
Capsula + Solo Seco (g)	84,78	77,48	82,95
Umidade (%)	19,4	19,4	19,3
		w (%) =	19,4

Dados gerais			
Anel:	Número	prensa	
	Constante	1,9	
Prensa:	CBR/MARSHALL		
Energia:	MODIFICADA		
Veloc. (mm/min)		1,27	

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	5,03	Peso (g)	Ai - Área Inicial (cm²) 19,89
Altura (cm)	10,37	337,70	Volume (cm³) 206,18

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q - Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001989	0	0,000	
0,02	5,48	0,019	0,001989	10,412	51,327	
0,06	9,78	0,058	0,001990	18,582	91,566	
0,10	15,39	0,096	0,001991	29,241	144,034	
0,14	22,36	0,135	0,001992	42,484	209,185	
0,27	46,27	0,260	0,001994	87,913	432,327	
0,41	67,41	0,396	0,001997	128,079	628,997	
0,54	81,87	0,521	0,001999	155,553	762,961	
0,64	85,1	0,617	0,002001	161,69	792,292	
0,90	67,73	0,868	0,002006	128,687	628,984	
1,05	53,2	1,013	0,002009	101,08	493,328	
1,12	47,33	1,080	0,002011	89,927	438,596	
1,19	41,09	1,148	0,002012	78,071	380,511	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES (NBR 12770)

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	I61	A-01	P06
Capsula (g)	27,97	28,10	24,50
Capsula + Solo Umido (g)	98,76	85,32	80,11
Capsula + Solo Seco (g)	84,95	74,22	69,25
Umidade (%)	24,2	24,1	24,3
		w (%) =	24,2

Dados gerais			
Anel:	Número	prensa	
	Constante	1,9	
Prensa:	CBR/MARSHALL		
Energia:	MODIFICADA		
Veloc. (mm/min)		1,27	

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	5,03	Peso (g)	380,05
Altura (cm)	10,36	Ai - Área Inicial (cm²)	19,84
		Volume (cm³)	205,58

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q -Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001989	0	0,000	
0,08	9,89	0,077	0,001991	18,791	92,578	
0,17	15,56	0,164	0,001992	29,564	145,527	
0,27	22,83	0,261	0,001994	43,377	213,314	
0,38	31,67	0,367	0,001996	60,173	295,596	
0,48	40,85	0,463	0,001998	77,615	380,909	
0,59	50,64	0,569	0,002000	96,216	471,693	
0,69	59,43	0,666	0,002002	112,917	553,032	
0,78	66,33	0,753	0,002004	126,027	616,701	
0,90	70,03	0,868	0,002006	133,057	650,342	
1,02	68,25	0,984	0,002009	129,675	633,071	
1,15	59,11	1,110	0,002011	112,309	547,596	
1,28	48,56	1,235	0,002014	92,264	449,290	
1,39	36,98	1,341	0,002016	70,262	341,781	
1,53	24,88	1,476	0,002019	47,272	229,634	



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES (NBR 12770)

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	Local:	Samambaia, DF
Furo:	Cota:	Operador:	Data: 28/05/2016

Umidade higroscópica			
Capsula N°	I05	I09	1
Capsula (g)	29,01	26,41	27,31
Capsula + Solo Umido (g)	87,80	77,32	83,69
Capsula + Solo Seco (g)	74,85	66,07	71,27
Umidade (%)	28,3	28,4	28,3
		w (%) =	28,3

Dados gerais			
Anel:	Número	prensa	
	Constante	1,9	
Prensa:	CBR/MARSHALL		
Energia:	MODIFICADA		
Veloc. (mm/min)		1,27	

GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA			
Diametro (cm)	5	Peso (g)	381,06
Altura (cm)	10	Ai - Área Inicial (cm²)	19,84
		Volume (cm³)	207,66

Compressão (mm)	Leitura do extens.	ϵ Def. Esp. (%)	Área da S.T. (m²)	Carga (kgf)	q - Tensão (kPa)	OBSERVAÇÕES
0,00	0	0	0,001989	0	0,000	
0,11	2,63	0,106	0,001991	4,997	24,612	
0,21	3,54	0,203	0,001993	6,726	33,095	
0,31	4,51	0,299	0,001995	8,569	42,123	
0,42	5,58	0,405	0,001997	10,602	52,061	
0,51	6,73	0,492	0,001999	12,787	62,736	
0,63	8,19	0,608	0,002001	15,561	76,257	
0,75	9,7	0,724	0,002003	18,43	90,212	
0,85	11,28	0,820	0,002005	21,432	104,804	
0,95	13,08	0,916	0,002007	24,852	121,410	
1,06	14,92	1,023	0,002010	28,348	138,341	
1,15	16,74	1,109	0,002011	31,806	155,080	
1,27	18,45	1,225	0,002014	35,055	170,722	
1,36	19,9	1,312	0,002015	37,81	183,977	
1,47	20,92	1,418	0,002018	39,748	193,199	
1,57	21,79	1,515	0,002020	41,401	201,036	
1,65	21,37	1,592	0,002021	40,603	197,007	
1,75	20,52	1,688	0,002023	38,988	188,986	
1,88	19,01	1,814	0,002026	36,119	174,855	
1,99	17,22	1,920	0,002028	32,718	158,220	

ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA - *PROCTOR* REDUZIDO



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste		
Energia de Compactação:	Proctor Reduzido	Data:	20/mai
Processo de preparação da amostra:	Compactação estática		

Localização do ponto na curva	Umidade (%)	γ_d (g/cm³)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)	Ph (g)
Ramo Seco	27	1,31	5	2	39,27	65,33
Umidade Ótima	31,5	1,41	5	2	39,27	72,81
Ramo Umido	34,5	1,35	5	2	39,27	71,30

Umidade			
Capsula N°	11	A38	A7
Capsula (g)	7,05	7,87	7,97
Capsula + Solo Umido (g)	20,43	24,29	18,07
Capsula + Solo Seco (g)	17,51	20,72	15,89
Umidade (%)	27,92	27,78	27,53
w (%) = 27,7			

Umidade			
Capsula N°	225	7M	14B
Capsula (g)	6,91	8,43	8,30
Capsula + Solo Umido (g)	20,42	25,29	27,39
Capsula + Solo Seco (g)	17,15	21,21	22,78
Umidade (%)	31,93	31,92	31,84
w (%) = 31,9			

Umidade			
Capsula N°	226	D	23
Capsula (g)	7,15	7,77	8,08
Capsula + Solo Umido (g)	22,36	24,41	24,76
Capsula + Solo Seco (g)	18,42	20,12	20,42
Umidade (%)	34,96	34,74	35,17
w (%) = 35,0			

		Umidade (%)	27,7			31,9			35,0		
		Amostra	R11	R12	R13	R21	R22	R23	R31	R32	R33
Dia 0	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,90	50,70	51,00	51,05	51,05	50,75	50,90	50,90	51,00
	26,0	Altura	19,55	20,70	20,00	19,70	19,90	19,60	20,60	20,00	19,65
	Umid. (%)	Volume (mm³)	39780,68	41790,36	40856,41	40322,51	40731,88	39647,70	41917,24	40696,35	40141,43
	41	Massa	64,31	64,42	65,62	70,10	71,48	70,32	68,52	67,02	70,44
Dia 3	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,70	50,45	50,90	50,60	50,60	50,40	50,30	50,50	50,40
	23,8	Altura	19,15	20,45	19,80	19,40	19,60	19,30	20,00	19,70	19,50
	Umid. (%)	Volume (mm³)	38661,13	40879,50	40289,38	39011,50	39413,68	38504,21	39742,56	39458,34	38903,22
	50	Massa	51,01	51,15	52,00	54,59	56,37	55,03	55,80	52,51	55,98
	Resultados	Retração (%)	-2,81	-2,18	-1,39	-3,25	-3,24	-2,88	-5,19	-3,04	-3,08
		Variação de Massa	-20,68	-20,60	-20,76	-22,13	-21,14	-21,74	-18,56	-21,65	-20,53
Dia 6	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,90	50,40	50,50	50,60	50,45	50,30	50,30	50,20	50,40
	25,5	Altura	19,05	20,30	19,40	19,30	19,50	19,20	19,50	19,70	19,50
	Umid. (%)	Volume (mm³)	38763,27	40499,25	38857,46	38810,41	38980,45	38152,86	38749,00	38990,93	38903,22
	48	Massa	50,42	50,62	51,52	53,31	54,30	53,56	51,66	50,08	52,90
	Resultados	Retração (%)	-2,56	-3,09	-4,89	-3,75	-4,30	-3,77	-7,56	-4,19	-3,08
		Variação de Massa	-21,60	-21,42	-21,49	-23,95	-24,03	-23,83	-24,61	-25,28	-24,90
Dia 10	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,70	50,20	50,50	50,30	50,40	50,30	50,20	50,20	50,40
	25,4	Altura	19,00	20,20	19,40	19,20	19,40	19,20	19,61	19,70	19,30
	Umid. (%)	Volume (mm³)	38358,30	39980,54	38857,46	38152,86	38703,72	38152,86	38812,79	38990,93	38504,21
	43	Massa	50,32	50,55	51,45	53,25	54,20	53,48	51,55	50,01	52,82
	Resultados	Retração (%)	-3,58	-4,33	-4,89	-5,38	-4,98	-3,77	-7,41	-4,19	-4,08
		Variação de Massa	-21,75	-21,53	-21,59	-24,04	-24,17	-23,95	-24,77	-25,38	-25,01
Dia 12	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,69	50,27	50,52	50,37	50,45	50,32	50,20	50,24	50,34
	26	Altura	19,00	20,22	19,40	19,23	19,41	19,12	19,61	19,51	19,25
	Umid. (%)	Volume (mm³)	38343,17	40113,91	38870,52	38301,33	38792,85	38014,16	38812,79	38668,73	38305,47
	48	Massa	50,27	50,52	51,42	53,20	54,15	53,44	51,49	49,96	52,78
	Resultados	Retração (%)	-3,61	-4,01	-4,86	-5,01	-4,76	-4,12	-7,41	-4,98	-4,57
		Variação de Massa	-21,83	-21,58	-21,64	-24,11	-24,24	-24,00	-24,85	-25,46	-25,08
Dia 16	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,68	50,33	50,53	50,43	50,49	50,34	50,20	50,27	50,27
	25	Altura	19,00	20,23	19,39	19,25	19,42	19,03	19,61	19,32	19,20
	Umid. (%)	Volume (mm³)	38328,05	40247,57	38883,58	38450,20	38882,11	37875,21	38812,79	38345,53	38107,36
	50	Massa	50,22	50,48	51,39	53,15	54,10	53,40	51,43	49,91	52,73
	Resultados	Retração (%)	-3,65	-3,69	-4,83	-4,64	-4,54	-4,47	-7,41	-5,78	-5,07
		Variação de Massa	-21,91	-21,64	-21,69	-24,18	-24,31	-24,06	-24,94	-25,53	-25,14

ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA - *PROCTOR* NORMAL



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	
Energia de Compactação:	Proctor Normal	Data: 20/mai
Processo de preparação da amostra:	Compactação estática	

Localização do ponto na curva	Umidade (%)	γ_d (g/cm³)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)	Ph (g)
Ramo Seco	25	1,38	5	2	39,27	67,74
Umidade Ótima	29	1,47	5	2	39,27	74,47
Ramo Umido	33	1,41	5	2	39,27	73,64

Umidade			
Capsula N°	22	X7	229
Capsula (g)	7,43	7,58	8,58
Capsula + Solo Umido (g)	20,79	19,54	23,09
Capsula + Solo Seco (g)	18,11	17,11	20,19
Umidade (%)	25,09	25,50	24,98
		w (%) =	25,2

Umidade			
Capsula N°	1M	101	2313
Capsula (g)	8,64	7,66	7,01
Capsula + Solo Umido (g)	26,84	19,32	24,41
Capsula + Solo Seco (g)	22,67	16,68	20,42
Umidade (%)	29,72	29,27	29,75
		w (%) =	29,6

Umidade			
Capsula N°	1	2A	T2
Capsula (g)	7,90	8,31	8,62
Capsula + Solo Umido (g)	20,94	28,50	24,60
Capsula + Solo Seco (g)	17,73	23,52	20,65
Umidade (%)	32,66	32,74	32,83
		w (%) =	32,7

		Umidade (%)	25,2			29,6			32,7		
		Amostra	N11	N12	N13	N21	N22	N23	N31	N32	N33
Dia 0	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,80	50,60	50,80	50,60	51,00	51,10	50,90	50,90	51,30
	26	Altura	20,20	19,40	19,60	20,05	19,90	20,10	20,20	20,40	19,80
	Umid. (%)	Volume (mm³)	40941,96	39011,50	39725,87	40318,59	40652,13	41221,87	41103,31	41510,28	40925,10
	41	Massa	68,03	67,86	67,66	74,23	74,17	74,24	73,02	71,90	72,74
Dia 3	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,70	50,50	50,60	50,70	50,80	50,40	50,65	50,54	50,20
	23,8	Altura	20,00	19,30	19,60	19,80	19,80	20,05	20,00	20,20	19,80
	Umid. (%)	Volume (mm³)	40377,16	38657,16	39413,68	39973,39	40131,23	40000,49	40297,56	40523,95	39188,85
	50	Massa	55,54	55,06	54,88	60,48	60,96	60,36	59,51	58,49	59,13
	Resultados	Retração (%)	-1,38	-0,91	-0,79	-0,86	-1,28	-2,96	-1,96	-2,38	-4,24
		Variação de Massa	-18,36	-18,86	-18,89	-18,52	-17,81	-18,70	-18,50	-18,65	-18,71
Dia 6	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,50	50,40	50,50	50,40	50,70	50,30	50,70	50,40	50,10
	25,5	Altura	19,70	19,00	19,30	19,70	19,60	19,90	19,80	20,00	19,90
	Umid. (%)	Volume (mm³)	39458,34	37905,70	38657,16	39302,23	39569,62	39543,85	39973,39	39900,74	39230,01
	48	Massa	54,20	53,99	53,87	57,60	57,36	57,49	55,38	54,48	55,13
	Resultados	Retração (%)	-3,62	-2,83	-2,69	-2,52	-2,66	-4,07	-2,75	-3,88	-4,14
		Variação de Massa	-20,33	-20,44	-20,38	-22,40	-22,66	-22,56	-24,16	-24,23	-24,21
Dia 10	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,60	50,40	50,40	50,48	50,61	50,32	50,60	50,30	50,10
	25,4	Altura	19,60	18,90	19,20	19,15	19,43	19,75	19,70	19,60	19,60
	Umid. (%)	Volume (mm³)	39413,68	37706,20	38304,71	38326,34	39087,27	39276,99	39614,77	38947,71	38638,60
	43	Massa	54,10	53,91	53,79	57,51	57,24	57,38	55,27	54,35	55,02
	Resultados	Retração (%)	-3,73	-3,35	-3,58	-4,94	-3,85	-4,72	-3,62	-6,17	-5,59
		Variação de Massa	-20,48	-20,56	-20,50	-22,52	-22,83	-22,71	-24,31	-24,41	-24,36
Dia 12	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,61	50,39	50,39	50,48	50,61	50,32	50,62	50,33	50,12
	26	Altura	19,59	18,88	19,18	19,15	19,43	19,75	19,68	19,58	19,61
	Umid. (%)	Volume (mm³)	39409,14	37641,38	38232,07	38326,34	39087,27	39276,99	39598,02	38954,39	38689,19
	48	Massa	54,06	53,85	53,75	57,47	57,47	57,33	55,21	54,32	54,99
	Resultados	Retração (%)	-3,74	-3,51	-3,76	-4,94	-3,85	-4,72	-3,66	-6,16	-5,46
		Variação de Massa	-20,54	-20,65	-20,57	-22,58	-22,52	-22,78	-24,40	-24,46	-24,41
Dia 16	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,62	50,38	50,37	50,48	50,61	50,32	50,63	50,36	50,14
	25	Altura	19,58	18,85	19,15	19,15	19,43	19,75	19,66	19,56	19,62
	Umid. (%)	Volume (mm³)	39404,59	37576,61	38159,49	38326,34	39087,27	39276,99	39581,23	38961,01	38739,82
	50	Massa	54,01	53,78	53,70	57,43	57,70	57,28	55,14	54,28	54,95
	Resultados	Retração (%)	-3,76	-3,68	-3,94	-4,94	-3,85	-4,72	-3,70	-6,14	-5,34
		Variação de Massa	-20,61	-20,75	-20,63	-22,63	-22,21	-22,84	-24,49	-24,51	-24,46

ENSAIO DE RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA - *PROCTOR* MODIFICADO



Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil

RETRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Amostra:	Aterro Sanitário Oeste	
Energia de Compactação:	Proctor Modificado	Data: 20/mai
Processo de preparação da amostra:	Compactação estática	

Localização do ponto na curva	Umidade (%)	γ_d (g/cm³)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)	Ph (g)
Ramo Seco	18,5	1,45	5	2	39,27	67,48
Umidade Ótima	23,5	1,59	5	2	39,27	77,11
Ramo Umido	28	1,54	5	2	39,27	77,41

Umidade			
Capsula N°	C1	1	246
Capsula (g)	7,83	7,67	7,37
Capsula + Solo Umido (g)	24,31	22,87	25,05
Capsula + Solo Seco (g)	21,62	20,42	22,19
Umidade (%)	19,51	19,22	19,30
		w (%) =	19,3

Umidade			
Capsula N°	Z5	T04	6E
Capsula (g)	6,96	7,33	7,89
Capsula + Solo Umido (g)	26,58	19,18	12,47
Capsula + Solo Seco (g)	22,79	16,90	11,59
Umidade (%)	23,94	23,82	23,78
		w (%) =	23,9

Umidade			
Capsula N°	4	214	8C
Capsula (g)	8,68	8,20	8,11
Capsula + Solo Umido (g)	24,96	21,77	18,77
Capsula + Solo Seco (g)	21,31	18,78	16,39
Umidade (%)	28,90	28,26	28,74
		w (%) =	28,6

		Umidade (%)	19,3			23,9			28,6		
		Amostra	M11	M12	M13	M21	M22	M23	M31	M32	M33
Dia 0	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,80	50,85	50,95	51,00	51,00	51,20	50,80	51,00	50,90
	26	Altura	20,75	21,10	20,60	20,40	21,15	20,00	20,15	20,60	20,50
	Umid. (%)	Volume (mm³)	42056,72	42850,34	41999,63	41673,54	43205,66	41177,48	40840,62	42082,10	41713,76
	41	Massa	67,86	67,56	67,38	75,75	75,05	74,28	76,59	76,89	75,93
Dia 3	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	51,00	50,90	50,75	50,40	50,60	50,80	50,50	50,65	50,60
	23,8	Altura	20,50	21,20	20,50	19,90	20,90	20,35	20,00	20,10	20,20
	Umid. (%)	Volume (mm³)	41877,82	43138,13	41468,26	39701,24	42027,85	41245,99	40059,23	40499,05	40620,22
	50	Massa	59,29	59,16	58,23	65,48	66,19	64,73	67,86	68,26	65,18
	Resultados	Retração (%)	-0,43	0,67	-1,27	-4,73	-2,73	0,17	-1,91	-3,76	-2,62
		Varição de Massa	-12,63	-12,43	-13,58	-13,56	-11,81	-12,86	-11,40	-11,22	-14,16
Dia 6	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,90	50,80	50,70	50,40	50,60	50,60	50,50	50,60	50,40
	25,5	Altura	20,40	20,90	20,40	20,10	21,00	20,40	20,00	20,20	20,30
	Umid. (%)	Volume (mm³)	41510,28	42360,75	41184,71	40100,24	42228,94	41022,40	40059,23	40620,22	40499,25
	48	Massa	56,90	56,62	56,43	61,31	60,79	60,04	59,60	60,06	59,14
	Resultados	Retração (%)	-1,30	-1,14	-1,94	-3,78	-2,26	-0,38	-1,91	-3,47	-2,91
		Varição de Massa	-16,15	-16,19	-16,25	-19,06	-19,00	-19,17	-22,18	-21,89	-22,11
Dia 10	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,80	50,70	50,70	50,40	50,60	50,60	50,40	50,50	50,40
	25,4	Altura	20,20	20,70	20,40	19,70	20,80	20,30	19,80	20,10	20,20
	Umid. (%)	Volume (mm³)	40941,96	41790,36	41184,71	39302,23	41826,76	40821,31	39501,73	40259,53	40299,75
	43	Massa	56,79	56,47	56,29	61,10	60,55	59,81	59,19	59,58	58,87
	Resultados	Retração (%)	-2,65	-2,47	-1,94	-5,69	-3,19	-0,86	-3,28	-4,33	-3,39
		Varição de Massa	-16,31	-16,42	-16,46	-19,34	-19,32	-19,48	-22,72	-22,51	-22,47
Dia 12	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,80	50,70	50,70	50,36	50,61	50,60	50,40	50,50	50,40
	26	Altura	20,20	20,70	20,40	19,69	20,83	20,27	19,80	20,10	20,20
	Umid. (%)	Volume (mm³)	40941,96	41790,36	41184,71	39209,99	41893,59	40742,88	39501,73	40259,53	40299,75
	48	Massa	56,74	56,45	56,26	61,07	60,53	59,79	59,16	59,55	58,84
	Resultados	Retração (%)	-2,65	-2,47	-1,94	-5,91	-3,04	-1,06	-3,28	-4,33	-3,39
		Varição de Massa	-16,39	-16,44	-16,51	-19,39	-19,35	-19,51	-22,76	-22,56	-22,51
Dia 16	Temp (° C)	Diâmetro (mm)	50,80	50,70	50,70	50,32	50,62	50,59	50,40	50,50	50,40
	25	Altura	20,20	20,70	20,40	19,67	20,85	20,23	19,80	20,10	20,20
	Umid. (%)	Volume (mm³)	40941,96	41790,36	41184,71	39117,90	41960,46	40664,47	39501,73	40259,53	40299,75
	50	Massa	56,69	56,43	56,22	61,03	60,50	59,76	59,12	59,51	58,81
	Resultados	Retração (%)	-2,65	-2,47	-1,94	-6,13	-2,88	-1,25	-3,28	-4,33	-3,39
		Varição de Massa	-16,46	-16,47	-16,56	-19,43	-19,39	-19,55	-22,81	-22,60	-22,55